



João Filipe Padilha Calinas

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

Um modelo de simulação de uma linha de produção da Delphi Portugal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Professora Doutora Ana Paula Barroso

Composição do Júri:

Presidente: Professor Doutor Rogério Puga Leal

Vogais: Professora Doutora Susana Duarte

Professora Doutora Ana Paula Barroso



João Filipe Padilha Calinas

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

Um modelo de simulação de uma linha de produção da Delphi Portugal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Professora Doutora Ana Paula Barroso

Composição do Júri:

Presidente: Professor Doutor Rogério Puga Leal

Vogais: Professora Doutora Susana Duarte

Professora Doutora Ana Paula Barroso

Um modelo de simulação de uma linha de produção da Delphi Portugal

Copyright © João Filipe Padilha Calinas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À Rita...

Agradecimentos

À Professora Ana Paula Barroso, minha orientadora, pela constante disponibilidade e pelas revisões de texto e sugestões que contribuíram para o sucesso desta dissertação.

À Eng.^a Zita Ramos, responsável pelo acompanhamento deste trabalho na *Delphi*, pelo encaminhamento e apoio ao longo de todo o período desta dissertação, mas também à Sílvia e Carina pelo suporte e boa disposição. Um agradecimento também a todos os colaboradores da *Delphi Automotive Systems Portugal*, pela disponibilidade e paciência demonstradas.

Um agradecimento especial à família, amigos e namorada, pelo encorajamento e incentivo nos bons e maus momentos.

Resumo

Esta dissertação insere-se no actual contexto de constante procura pela melhoria do desempenho dos sistemas produtivos em que se pretende estudar a utilização dos recursos produtivos numa das principais linhas de produção da fábrica da *Delphi* no Seixal. Para o efeito, é desenvolvido um modelo de simulação da linha de produção.

O estudo inicia com uma revisão bibliográfica de conceitos e metodologias interligados com a simulação de sistemas. A fase seguinte diz respeito à recolha e tratamento de dados que caracterizam a linha de produção que se pretende simular. Posteriormente, é criado um modelo conceptual da linha de produção que serve de base ao modelo de simulação desenvolvido recorrendo ao *software* de simulação Arena. Após a simulação do modelo desenvolvido, é realizada a validação do modelo através da análise comparativa de algumas medidas de desempenho resultantes da simulação e do sistema real. Por último é realizada a discussão de resultados e são tecidas considerações que suportam os resultados obtidos e apoiam a diferença de resultados verificada.

Palavras-chave: *Delphi*, Linha de Produção, Modelo de Simulação, Arena.

Abstract

This dissertation is embedded in the current environment of constant pursuit for production systems' improvement in which it is intended to study the current utilization of the productive resources in one of the main production lines of Delphi's plant at Seixal. Considering this, a simulation model of the production line is developed.

The present study starts with a bibliographical review of the main concepts and methodologies related with systems' simulation. The next stage involves the collection and handling of data that defines the production line which is intended to be simulated. A conceptual model of the production line is then created, which serves as a basis for the development, in Arena, of the simulation model. As the model simulation is completed, its validation is achieved by comparing performance measures resulting from the simulation with those from the real system. In the final chapter of this dissertation, considerations are made in order to support the results obtained.

Keywords: Delphi, Production Line, Simulation Model, Arena.

Índice de Matérias

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA	1
1.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO	2
1.3 METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO.....	2
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1 SIMULAÇÃO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO	7
2.2 ESTUDO DE SIMULAÇÃO	9
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	12
2.4 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO	14
2.4.1 Sistemas de Produção.....	15
2.4.2 Arena em Sistemas de Produção.....	16
2.4.2 Outras Áreas	21
3. CASO DE ESTUDO.....	23
3.1 DELPHI AUTOMOTIVE SYSTEMS PORTUGAL	23
3.1.1 Complexo Fabril do Seixal.....	24
3.2 LINHA DE PRODUÇÃO EM ANÁLISE.....	25
3.2.1 Modelos Produzidos	25
3.3.2 Fluxo de Processos.....	27
3.3.3 Layout da Linha de Produção	29
3.3.4 Funcionamento Actual da Linha.....	30
3.3.5 Desempenho Actual da Linha	37
4. TRATAMENTO DE DADOS E MODELO CONCEPTUAL.....	39
4.1 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS.....	39
4.1.1 Período de Funcionamento	40
4.1.2 Tempos de Paragem	43
4.2 MODELO CONCEPTUAL.....	43
4.2.1 Simplificações e Pressupostos Assumidos	45
5. MODELO DE SIMULAÇÃO	47
5.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	47
5.2 SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	52
6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO	59
6.1 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	59
6.2 CONCLUSÕES AO TRABALHO	61

REFERÊNCIAS.....	63
ANEXOS.....	67
ANEXO 1.....	67
ANEXO 2.....	67

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Metodologia da investigação.....	4
Figura 2.1 - Estudo de um sistema	8
Figura 2.2 - Metodologia para o estudo de simulação	10
Figura 2.3 - Classificação de modelos de simulação	13
Figura 3.1 - Instalações da Delphi no Seixal.....	24
Figura 3.2 - Modelos de bobinas de ignição produzidos na linha.....	25
Figura 3.3 - Fluxo de processos das bobinas de ignição.....	27
Figure 3.4 - Fluxo de processos do modelo de bobina M274.....	28
Figure 3.5 - Fluxo de processos do modelo de bobina M276.....	28
Figura 3.6 - Layout da linha de produção da <i>Delphi</i>	29
Figura 4.1 - Ajustamento sugerido pelo Input Analyzer para a Célula do Secundário.....	41
Figura 4.2 - Grau de ajuste das diferentes distribuições.....	41
Figura 4.3 - Modelo conceptual do sistema em estudo.....	44
Figura 5.1 - Modelo macro do sistema.....	48
Figura 5.2 - Definição de horários de cada estação de trabalho.....	48
Figura 5.3 - Especificações realizadas no módulo <i>Failure</i>	49
Figura 5.4 - Definição dos possíveis estados de cada estação.....	50
Figura 5.5 - Especificações realizadas no módulo <i>Resource</i>	50
Figura 5.6 - Algoritmo criado para o controlo de produção.....	51
Figura 5.7 - Caixa de diálogo <i>Run Setup</i> para a configuração das replicações.....	53
Figura 5.8 - Relatório de produção por estação.....	54
Figura 5.9 - Detalhe do relatório <i>Frequencies</i>	54
Figura 5.10 - Produção por estação com base no modelo e sistema real.....	56
Figura 5.11 - Comparação entre a utilização por estação do modelo e do sistema real.....	57

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Exemplos de aplicação do Arena na simulação de sistemas de produção.....	20
Tabela 2.2 - Exemplos de aplicação da simulação em diferentes áreas de actividade.....	22
Tabela 3.1 - Volumes anuais de produção previstos por modelo.....	26
Tabela 3.2 - Estações de trabalho da linha em estudo.....	30
Tabela 3.3 - Turnos de trabalho e paragens programadas.....	30
Tabela 3.4 - Especificações da estação Inserção do Díodo e Terminal.....	31
Tabela 3.5 - Funcionamento da Célula do Secundário.....	32
Tabela 3.6 - Funcionamento da Sub-Montagem do Primário.....	32
Tabela 3.7 - Funcionamento da Célula do Primário M274.....	33
Tabela 3.8 - Funcionamento da Célula do Primário M276.....	34
Tabela 3.9 - Funcionamento da Célula de Montagem M274.....	34
Tabela 3.10 - Funcionamento da Célula de Montagem M276.....	35
Tabela 3.11 - Funcionamento da Potter.....	36
Tabela 3.12 - Funcionamento da Célula Final.....	36
Tabela 3.13 - Desempenho da linha de produção para o mês de Fevereiro de 2014.....	37
Tabela 4.1 - Distribuições estatísticas para os períodos de funcionamento de cada estação.....	42
Tabela 4.2 - Distribuições estatísticas que modelam os tempos de paragem.....	43
Tabela 5.1 - Peças produzidas e taxa de utilização média para as estações de trabalho.....	55

1. Introdução

O presente documento está inserido no âmbito do desenvolvimento da dissertação necessária à conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

O trabalho descrito nesta dissertação foi desenvolvido com base num caso de estudo real na fábrica do Seixal da empresa *Delphi Automotive Systems Portugal*. A *Delphi Automotive Systems Portugal* pertence ao Grupo *Delphi*, o maior fornecedor a nível mundial de componentes electrónicos e sistemas de transporte para a indústria automóvel.

Neste capítulo introdutório são apresentados o enquadramento do problema, os objectivos a atingir, a metodologia usada no desenvolvimento do trabalho e, por fim, a estrutura geral da dissertação.

1.1 Enquadramento do Problema

As empresas de produção industrial têm vindo a enfrentar, nos anos mais recentes, um ambiente cada vez mais competitivo. Factores como o aumento do número de concorrentes, as constantes inovações introduzidas no mercado e a redução do ciclo de vida dos produtos forçam as empresas a uma melhoria constante dos seus processos. A redução dos custos de produção apresenta-se, assim, como uma prioridade (Pita & Wang, 2010). O facto de apenas uma pequena parte do tempo e de recursos usados no processamento de um produto adicionar valor ao consumidor final deu origem ao aparecimento, na década de 1940, da filosofia *Lean*. A redução de inventário e de tempos de processamento e a eliminação de desperdícios são algumas das vantagens que resultam da implementação da filosofia *Lean* no processo produtivo (Melton, 2005).

A técnica de simulação tem vindo a ser bastante utilizada nas últimas décadas como ferramenta de suporte à tomada de decisão, nomeadamente em sistemas de produção. Esta técnica permite a construção mais rápida e menos dispendiosa

de modelos virtuais de sistemas complexos e, assim, o estudo de diferentes cenários antes da decisão ser tomada e o sistema implementado (Seleim, Azab, & Algeddawy, 2012). Contudo, a sua utilização em Portugal e, em particular, em ambientes produtivos, é ainda escassa, resultado em parte da persistência de algum cepticismo em relação aos potenciais benefícios da simulação e, em parte, da falta de condições e disponibilidade para desenvolver um modelo complexo que represente fidedignamente um sistema produtivo.

É neste contexto de constante procura pela melhoria do desempenho dos sistemas produtivos que é desenvolvido o modelo de simulação, ponto-chave desta dissertação. Tendo em conta a relevância do funcionamento eficaz e eficiente do sistema produtivo no desempenho da empresa, é importante saber em que medida estão a ser utilizados os recursos produtivos numa das principais linhas de produção da fábrica da *Delphi* no Seixal.

A linha de produção a modelar faz parte do processo de produção de 4 modelos de ignição e é constituída por diversas estações de trabalho, a maioria afecta a mais do que um modelo.

1.2 Objectivos do Trabalho

Pretende-se com a presente dissertação desenvolver um modelo de simulação capaz de reproduzir o funcionamento de uma das principais linhas de produção da fábrica da *Delphi* e obter o respectivo desempenho no que diz respeito aos indicadores de produção e de utilização de cada estação de trabalho.

1.3 Metodologia da Investigação

Para atingir os objectivos estabelecidos é realizada, numa primeira fase da dissertação, uma revisão de literatura, fundamentalmente em revistas científicas. Nesta fase, pretende-se fazer o estado da arte no que diz respeito à técnica de simulação para, assim, obter informação que ajude a responder às seguintes questões:

- Que vantagens poderão advir da utilização da simulação na modelação de um sistema produtivo?

- Quais os diferentes tipos de simulação e qual o mais indicado para o problema em análise?
- Em que outros contextos foi utilizada esta forma de modelação e com que resultados?
- Quais as medidas de desempenho mais utilizadas na análise de sistemas produtivos?

A revisão de literatura permitirá realizar o enquadramento teórico que suporta este trabalho.

Seguir-se-á, então, a fase de recolha de dados e de desenvolvimento do modelo conceptual, um modelo desenvolvido em pseudo-código que representa, de uma forma esquemática, o funcionamento actual do sistema. Esta fase encerra um processo iterativo enquanto o modelo conceptual não for considerado válido. As alterações realizadas ao modelo conceptual podem criar a necessidade de recolher mais dados mas caso não seja possível a recolha desses dados então será necessário alterar o modelo conceptual. A unidade do Seixal da *Delphi Automotive Systems* Portugal conta com escritórios, linhas de produção e armazéns. Será na linha de produção dos modelos de bobinas M274 e M276, pertencentes à família de bobinas de ignição *Plug Top Coil Multispark* que será realizada a recolha de dados. Esta fase é de importância crítica para o sucesso da dissertação, uma vez que é com base nos dados recolhidos que será definido o conjunto de parâmetros de *input* do modelo de simulação. A recolha de dados diz respeito aos *layouts* actuais da linha de produção, aos tempos de processamento das máquinas, à dimensão máxima actual dos supermercados intermédios e outros dados que ajudem a caracterizar a linha de produção. Alguns dados recolhidos nesta fase serão, então, tratados estatisticamente e outros serão analisados.

O passo seguinte será traduzir o modelo conceptual num modelo “escrito” numa linguagem que o computador perceba. No desenvolvimento do modelo no computador será utilizado o *Arena*, um *software* de simulação desenvolvido pela *Rockwell Automation*. O modelo computacional será verificado e validado através de uma análise comparativa dos valores obtidos para as medidas de desempenho consideradas, quer a partir do sistema real quer a partir do modelo de simulação, pelo que terá de ser simulado o funcionamento normal da linha de produção para um determinado período de tempo.

Finalmente, os resultados obtidos na etapa de validação do modelo de simulação são discutidos. São tecidas considerações que suportam o resultado obtido e apresentadas as conclusões ao estudo desenvolvido.

O esquema apresentado na Figura 1.1 descreve, sucintamente, a metodologia utilizada no desenvolvimento da dissertação.

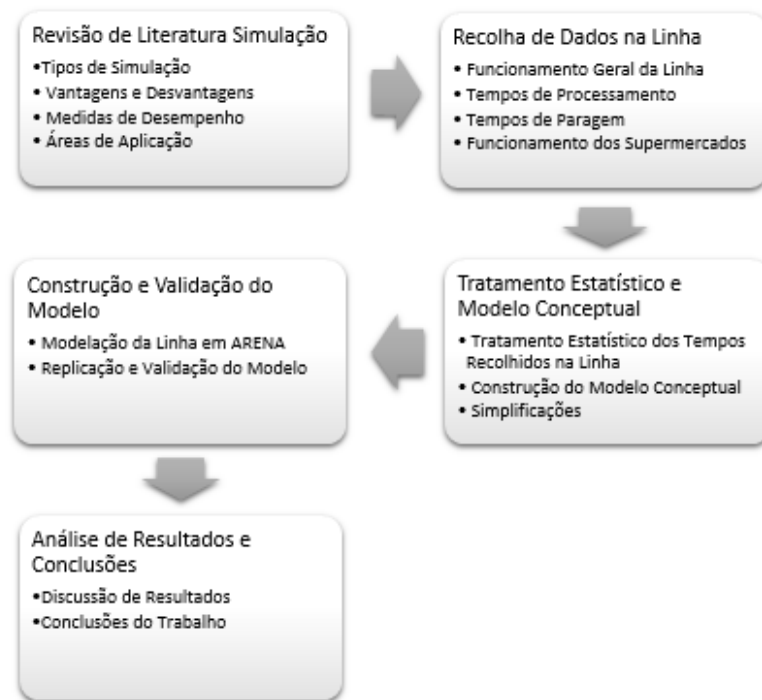


Figura 1.1 - Metodologia da investigação.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. O capítulo 1 descreve a temática do trabalho, o seu enquadramento, objectivos e a metodologia utilizada no seu desenvolvimento.

O capítulo 2 é composto pela revisão de literatura que fundamenta o trabalho. É descrito o estado da arte no que à técnica de simulação diz respeito, assim como a sua aplicação aos sistemas produtivos.

O capítulo 3 é constituído pela descrição do caso de estudo. É apresentada a empresa e, em particular, a unidade de fabrico situada no Seixal, bem como a linha de produção que é alvo de análise.

O capítulo 4 descreve o modelo conceptual e algumas simplificações e pressupostos assumidos relativamente ao funcionamento da linha, bem como a fase de tratamento estatístico dos tempos recolhidos.

No capítulo 5 são apresentados os principais passos na construção do modelo de simulação em Arena, bem como os resultados obtidos para a replicação do modelo e o processo de validação do mesmo.

Finalmente, a discussão dos resultados obtidos e as conclusões do estudo estão presentes no capítulo 6, onde também são apresentadas as principais contribuições desta dissertação. Adicionalmente, são apresentados possíveis desenvolvimentos futuros.

2. Revisão de Literatura

No presente capítulo é desenvolvida uma revisão de literatura com o objectivo de contextualizar teoricamente o trabalho. Assim, é fornecida uma visão geral dos conceitos e metodologias relacionados com a técnica de simulação de um sistema. Adicionalmente, são apresentados estudos que demonstram a aplicação da simulação em diferentes contextos.

2.1 Simulação como Ferramenta de Suporte à Tomada de Decisão

Face aos desafios que as empresas enfrentam na actualidade, e particularmente o sector da produção industrial, cada vez mais os gestores têm de ter a capacidade de tomar decisões em ambientes de incerteza. A capacidade de analisar um sistema e identificar limitações e oportunidades de melhoria pode fazer a diferença no desempenho do sistema produtivo e, consequentemente, da empresa. Ferramentas que auxiliem nesta análise possibilitam um maior conhecimento do sistema em estudo e, consequentemente, uma tomada de decisão mais eficaz e eficiente.

Existem diversas maneiras de fazer o estudo de um sistema. Law e Kelton (2000) definem a simulação, enquanto ferramenta de análise de um sistema, de acordo com o representado na Figura 2.1.

Podemos estudar um sistema intervindo directamente no próprio sistema ou construindo e analisando um modelo que reproduza o comportamento do sistema. Em muitos casos a intervenção directa no sistema é impracticável, quer por ser dispendioso e afectar o normal funcionamento do mesmo, quer por o sistema ainda não existir. Nestes casos, pode ser construído um modelo do sistema. Protótipos e modelos à escala constituem exemplos de modelação física de sistemas, e são muitas vezes fonte de informação valiosa relativamente a sistemas reais. No caso do modelo físico ser impracticável ou insuficiente, deve ser desenvolvido um modelo matemático. Modelos matemáticos podem ser

analíticos ou de simulação. Os modelos analíticos fornecem resultados exactos, mas requerem muitas simplificações para o estudo de sistemas mais complexos (Law e Kelton, 2000).

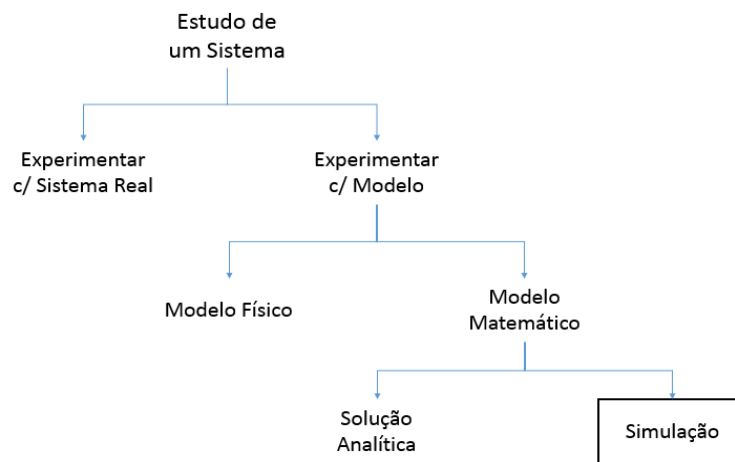


Figura 2.1 - Estudo de um sistema.

Adaptado de: Law e Kelton (2000).

A simulação é o processo de conceptualização e desenvolvimento de modelos computadorizados de sistemas reais, com o objectivo de realizar experiências sobre o modelo e, assim, compreender melhor o comportamento do sistema quando sujeito a determinadas condições. Apesar de útil no estudo de sistemas simples, as virtudes da técnica de simulação destacam-se quando é utilizada no estudo de sistemas complexos (Kelton, Sadowski, & Sadowski, 2001).

São numerosas as vantagens da simulação, de entre as quais se destacam (Banks *et al.*, 2005 e Shannon, 1998):

- Permite a identificação de pontos de estrangulamento (*bottlenecks*) nos fluxos de informação, material e/ou produto;
- Possibilita o estudo de sistemas reais complexos, difíceis de representar através de modelos analíticos;
- Possibilita o estudo de novas configurações do sistema ou *layouts* alternativos sem custos de implementação;
- Permite a exploração de novos procedimentos operacionais, de estruturas organizacionais, de fluxos de informação e de políticas de recursos humanos sem a interrupção do normal funcionamento do sistema;

- Permite o controlo do factor tempo. Os modelos podem simular o funcionamento do sistema durante meses e anos em minutos, apresentando resultados a longo prazo;
- Permite a realização de análises de sensibilidade, e deste modo a identificação das variáveis que mais influenciam o desempenho do sistema.

Contudo, a modelação de sistemas por simulação também apresenta desvantagens ou limitações, de entre as quais se destacam as seguintes (Banks *et al.*, 2005 e Shannon, 1998):

- Obriga ao desenvolvimento de um modelo de simulação que, na maior parte das vezes, é um processo demorado e dispendioso;
- A utilidade do estudo de simulação depende muito da qualidade do modelo e, por isso, das capacidades técnicas do modelador;
- Os resultados obtidos podem ser de difícil interpretação;
- A tarefa de recolha de dados consome muito tempo podendo estar associada a alguma complexidade resultando, muitas vezes, *inputs* questionáveis;
- A simulação não é uma ferramenta de optimização de sistemas. Uma das razões é a componente estocástica do modelo que origina valores diferentes a cada replicação.

Tendo em conta as vantagens e limitações apresentadas, e uma vez que os grandes objectivos do presente trabalho são o estudo de uma complexa linha de produção, a simulação parece constituir a melhor abordagem ao problema. Seguidamente são descritos os principais passos a realizar num estudo de simulação.

2.2 Estudo de Simulação

Um estudo de simulação requer conhecimento não só da metodologia de simulação mas também da teoria de probabilidade e estatística, para além de um conhecimento detalhado das operações do sistema em análise. A programação do modelo representa apenas 25 a 50 % do trabalho necessário à realização de

um estudo de simulação (Law, 2003). O mesmo autor descreve a metodologia a seguir para a realização de um estudo de simulação bem-sucedido. Esta metodologia, composta por 7 passos, encontra-se esquematizada na Figura 2.2 e será explicada de seguida.

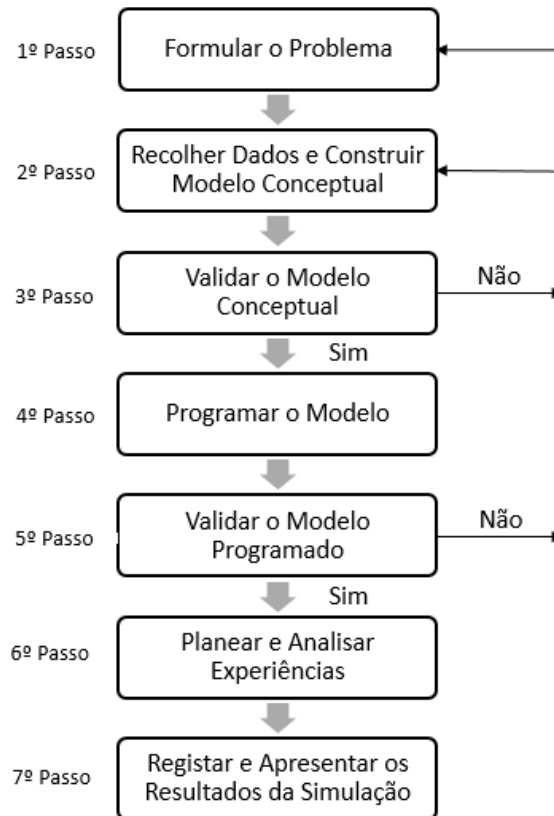


Figura 2.2 - Metodologia para o estudo de simulação.

Adaptado de: Law (2003).

- **1º Passo - Formular o Problema**

Cabe ao decisor formular o problema em estudo. Nesta fase, devem ser definidos os objectivos do estudo, as questões a serem respondidas, os recursos disponíveis e o enquadramento temporal do estudo. Além disso, devem ser estabelecidas as diferentes configurações do sistema a modelar, bem como as medidas de desempenho que serão usadas na avaliação do comportamento das diferentes configurações.

- **2º Passo - Recolher Dados e Construir o Modelo Conceptual**

O objectivo passa por compreender o funcionamento do sistema a ser modelado. A recolha de dados deve incidir sobre a estrutura e as operações existentes no sistema.. Um erro comum em estudos de simulação é o uso de distribuições de probabilidade inapropriadas para modelar os dados recolhidos.

Os dados recolhidos, bem como pressupostos e/ou simplificações feitas ao modelo, devem ser devidamente documentadas. É nesta fase que é desenvolvido um modelo conceptual. O documento deve incluir, entre outros elementos, um diagrama do layout do sistema ou dos fluxos de processo, a descrição detalhada de cada sub-sistema produtivo, as simplificações feitas ao sistema e os principais dados estatísticos de *input* do modelo.

Importa, ainda, recolher informação no que diz respeito ao desempenho do sistema real, por forma a realizar a validação do modelo de simulação (Passo 5).

- **3º Passo - Validar o Modelo Conceptual**

Na etapa de validação do modelo conceptual, este deve ser apresentado e discutido com o gestor do projecto, analistas e outras pessoas com ligação ao projecto. A validação do modelo impede simplificações e pressupostos errados, promove a interação entre os membros da equipa e evita que se inicie a programação do modelo com base num modelo conceptual incompleto ou mal concebido.

No caso de serem detectados erros ou omissões no modelo conceptual, este deve ser corrigido e actualizado, voltando ao passo 1, antes de se prosseguir com a programação do modelo, passo 4.

- **4º Passo - Programar o Modelo**

Programar o modelo de simulação através de linguagens de programação (C ou C++) ou através de um *software* de simulação comercial é uma decisão que deve ser tomada neste passo. As linguagens de programação oferecem um maior controlo ao utilizador para além de implicar menores custos de aquisição. No entanto, regra geral, resultam num tempo de desenvolvimento/programação elevado. Os pacotes comerciais de simulação, por outro lado, permitem uma simulação mais rápida e, em termos gerais, menores custos de projecto.

- **5º Passo – Validar o Modelo Programado**

No caso do sistema em estudo já existir, uma das técnicas de validação que pode ser usada é a comparação dos resultados obtidos pelo modelo de simulação e dos provenientes do sistema real, no que às medidas de desempenho diz respeito. Se a comparação dos resultados for bem sucedida, o modelo de simulação pode ser considerado credível pois reproduz o comportamento do sistema. No caso de a validação não ser bem sucedida, o problema pode estar nos dados recolhidos e/ou no modelo conceptual construído, pelo que deve voltar ao passo 2.

- **6º Passo – Planear e Analisar Experiências**

As diferentes configurações serão planeadas de acordo com os objectivos a atingir. Para cada configuração do sistema a estudar, devem ser decididos os parâmetros de simulação, nomeadamente, o número de replicações, a duração da simulação e, quando adequado, a duração do período de aquecimento do sistema (*Warm up period*).

- **7º Passo – Registrar e Apresentar os Resultados da Simulação**

A documentação relativa ao estudo de simulação deve incluir uma descrição do modelo conceptual para poder ser a base em futuras utilizações, uma descrição pormenorizada da programação do modelo e os resultados/conclusões obtidos do estudo realizado.

2.3 Classificação de Modelos de Simulação

Os modelos de simulação podem ser caracterizados de acordo com vários critérios. A forma mais consensual de classificar os modelos de simulação é através dos seguintes critérios (Kelton *et al.*, 2001):

- **Estático vs Dinâmico:** Nos modelos estáticos a variável tempo não é significativa, ao contrário do que sucede nos modelos dinâmicos. Assim, o factor diferenciador entre os modelos estáticos e dinâmicos é a variável tempo;
- **Contínuo vs Discreto:** Nos modelos de simulação contínuos o estado do sistema altera-se de um modo contínuo no decorrer do tempo. Nos modelos discretos, por sua vez, a alteração de estado do sistema apenas se

verifica em instantes de tempo discretos. Estes pontos discretos no tempo podem ser, a título de exemplo, a chegada ou partida de entidades do sistema ou a avaria de uma máquina;

- **Determinístico vs Estocástico:** Os modelos determinísticos caracterizam-se por não conterem parâmetros aleatórios. Os modelos estocásticos, por sua vez, consideram a existência de pelo menos uma variável ou parâmetro estocástico, produzindo, consequentemente, *outputs* também estocásticos. Assim, é importante ter este aspecto em conta durante a fase de análise e interpretação dos resultados da simulação.

Tendo em conta a classificação apresentada, os modelos de simulação podem ser sistematizados de acordo com a Figura 2.3 (Barroso, 2012).

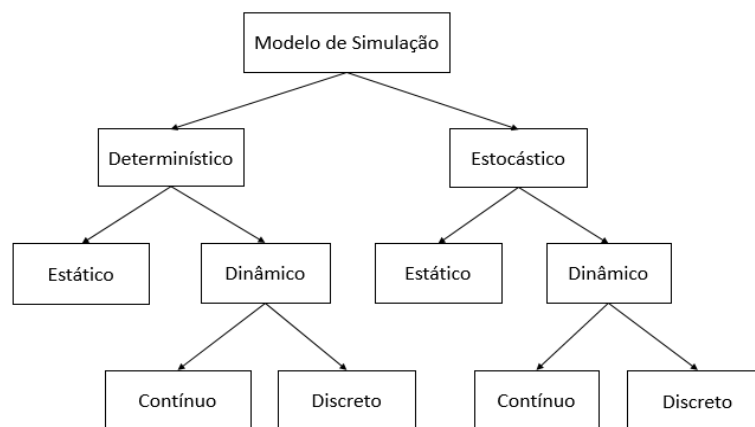


Figura 2.3 - Classificação de modelos de simulação.

Adaptado de: Barroso (2012).

O *software* Arena foi desenvolvido sobretudo com o intuito de simular modelos dinâmicos. O Arena permite, ainda, a simulação de modelos contínuos, discretos, mistos e modelos com *inputs* determinísticos e estocásticos (Kelton *et al.*, 2001).

A Simulação de Acontecimentos Discretos ou *Discrete Event Simulation* (DES) é o método mais utilizado na simulação de sistemas de produção. Actualmente, a simulação de acontecimentos discretos pode ser feita recorrendo a *softwares* de simulação como o AutoMod, o WITNESS, o ProModel ou o Arena. Neste tipo de simulação, os componentes do sistema são modelados como sendo objectos com atributos. O estado desses objectos altera-se como resposta a acontecimentos

discretos. Para melhor compreensão, e utilizando como exemplo um sistema de produção, as máquinas e os operários são vistos como objectos, e os seus atributos podem ser a sua disponibilidade ou o tempo que demoram a terminar uma tarefa (Seleim et al., 2012).

Para além da classificação dos modelos de simulação apresentada, é possível classificar um estudo de simulação em *terminating* ou *steady-state*, de acordo com o objectivo com que o estudo é realizado. Numa simulação do tipo *terminating*, o sistema a ser representado dita condições específicas de início e de fim para a simulação. Um exemplo deste tipo de simulação é uma linha que opera até que seja cumprida uma ordem de produção de 500 unidades. Para este tipo de simulação, a janela temporal de simulação está bem definida por condições desde o início do estudo. Por sua vez, numa simulação do tipo *steady-state*, pretende-se estudar o sistema numa janela de tempo teoricamente infinita. Numa simulação *steady-state* as condições iniciais da simulação não são relevantes. Neste tipo de simulação o interesse é estudar o sistema no seu estado de equilíbrio (Kelton et al., 2001).

2.4 Aplicação da Simulação

São muitas as áreas de actividade onde a técnica de simulação tem vindo a ser utilizada no decorrer das últimas décadas. A produção industrial é, tradicionalmente, uma das mais investigadas por meio de simulação mas, cada vez, mais outros sectores de actividade recorrem à simulação como forma de identificar problemas, estudar novos processos e melhorar a utilização dos seus recursos. No presente capítulo são revistos alguns dos mais recentes e significativos trabalhos de aplicação da simulação, quer em ambiente de produção quer noutros sectores de actividade. São destacadas as diferentes problemáticas investigadas e as soluções oferecidas pela técnica de simulação.

2.4.1 Sistemas de Produção

Nos últimos 30 anos, a simulação tem vindo a ser amplamente utilizada como ferramenta de análise de sistemas produtivos. Ao longo deste período, a simulação despertou o interesse de académicos e profissionais e foi tema de milhares de artigos científicos, livros e conferências (Smith, 2003).

Law e McComas (1999) identificam e classificam as principais questões investigadas, no domínio dos sistemas de produção, através da técnica de simulação em três grupos:

a) Equipamentos e Pessoas

- Avaliação e dimensionamento do número, tipo e layout de máquinas para um objectivo específico;
- Avaliação da necessidade de correias transportadoras e outros equipamentos de suporte;
- Localização e dimensão dos supermercados de inventário;
- Avaliação de uma alteração no volume ou no mix de produto;
- Avaliação do efeito causado pela introdução de um novo equipamento num sistema de produção já existente;
- Avaliação de investimentos de capital;
- Planeamento das necessidades de trabalho;
- Número de turnos de trabalho.

b) Avaliação de Desempenho

- Análise de produtividade;
- Análise de tempos de ciclo e de espera no sistema;
- Análise de pontos de estrangulamento da produção.

Os mesmos autores (Law e McComas, 1999) identificam, ainda, as medidas de desempenho que mais frequentemente são estimadas por meio de simulação, no contexto dos sistemas de produção, nomeadamente:

- Produtividade;
- Tempo de permanência no sistema de um componente;
- Tempo em espera de um componente;
- Dimensão das filas de espera;
- Pontualidade de entregas;
- Taxa de utilização de equipamento e pessoal.

c) Avaliação de Procedimentos Operacionais

- Planeamento da produção;

- Políticas de gestão de inventário;
- Análises de fiabilidade do sistema;
- Políticas de controlo da qualidade.

2.4.2 Arena em Sistemas de Produção

Dado o grande número de trabalhos disponíveis na literatura que abordam a temática da simulação em contexto de produção, no presente sub-capítulo será dado ênfase apenas a trabalhos em que é usado o *software* Arena em casos de estudo reais, sendo analisada a forma como os seus autores modelaram o sistema em estudo, os objectivos que se propõem atingir e os resultados obtidos. O presente sub-capítulo é de particular interesse pois permitirá identificar semelhanças entre casos de estudo publicados na literatura e a linha de produção que se pretende modelar no presente trabalho.

A. "A Simulation Study to Increase the Capacity of a Rusk Production Line"

O trabalho de Abed (2008) apresenta a aplicação da simulação a uma linha de produção de tostas alimentares. O estudo é justificado pela necessidade de aumentar as taxas de produção da única linha existente na fábrica, dada a restrição de espaço existente e, também, o aumento significativo da procura dos produtos fabricados.

Tendo em conta a dimensão da linha, o autor subdivide-a em 4 fases, que vão desde a preparação dos materiais básicos e da massa de pão até ao embalamento e armazenamento. Para a modelação em Arena, o autor desenvolve 4 sub-modelos, um para cada fase, e recolhe tempos directamente da linha que são posteriormente tratados estatisticamente recorrendo à aplicação *Input Analyzer*, que sugere distribuições de probabilidade e respectivos parâmetros a ajustar aos dados recolhidos. Como forma de validar o modelo de simulação, o autor compara o número de caixas de tostas produzidas por dia, obtido pelo modelo e pelo sistema real, considerando-o válido.

No que diz respeito às condições de replicação do modelo, o autor considera necessária a existência de um período durante o qual não é feita a recolha de qualquer estatística (*warm-up period*), uma vez que o sistema em estudo é de natureza *steady-state*, funcionando continuamente 24 horas por dia, 7 dias por

semana. O período de aquecimento permite ao sistema atingir estado estacionário, momento a partir do qual é realizada a recolha de dados, sendo as estatísticas determinadas sem a tendência inicial. Para determinar o período de aquecimento a considerar, o autor recorre à aplicação *Output Analyzer* e analisa o funcionamento de um recurso ao longo do tempo. Através de uma análise ao número de entidades no sistema, número de entidades em fila ou a taxa de utilização do recurso, foi possível perceber que o recurso atinge o estado de equilíbrio num determinado período de tempo, período que foi considerado como *warm-up period*.

Para medir o desempenho da linha de produção actual e dos diferentes cenários propostos, o autor considera as medidas de desempenho taxa de utilização dos equipamentos de produção, dimensão média das filas de espera em cada estação, tempo médio de espera em cada fila e, ainda, o tempo total médio de produção de uma caixa de tostas.

Após a simulação do modelo, o autor estima o desempenho da linha de produção com base nas medidas de desempenho apresentadas. Identificadas várias oportunidades de melhoria, são descritos e estudados 7 cenários alguns dos quais incluem a adição de máquinas a estações diagnosticadas como *bottleneck* e outras propões alterações no processo produtivo. Cada cenário é replicado 3 vezes, durante um período de 7 dias. O autor conclui que as alterações efectuadas possibilitam um aumento de 50% na produção e uma diminuição de 11% no tempo médio total de produção de uma caixa de tostas, devido a uma melhor utilização dos recursos, a uma redução dos tempos de espera e à eliminação de pontos de estrangulamento.

B. "Utilizing simulation to evaluate production line performance under varying demand conditions"

McDonald, Van Aken e Ellib (2012) desenvolvem um modelo de simulação em Arena de uma nova linha de produção a implementar. Os autores definem como objectivo a análise da capacidade de resposta da linha de produção a variações nos níveis de procura dos dois tipos de motores produzidos.

Os dois tipos de motores apresentam, cada um, diversas variantes, e cada variante passa por duas sub-montagens e uma montagem final. Uma das sub-

montagens é partilhada por todos os motores produzidos, ao passo que as restantes estações são dedicadas. A linha de produção a modelar é, assim, constituída por 5 estações de trabalho: uma estação de sub-montagem partilhada, uma estação de sub-montagem dedicada a cada tipo de motor e mais duas estações de montagem final, uma para cada tipo de motor.

Durante o processo de modelação em Arena os autores criam 7 sub-modelos, um para cada estação de trabalho, um para a chegada das ordens de produção e outro para o processo de expedição. No modelo, cada variante de motor é modelado como uma entidade e o mix de produção de cada variante de motor é modelado através de uma variável. Os autores usam 5 módulos *Create* para modelar a chegada de cada variante de motor (três variantes do motor 1 e duas variantes do motor 2). Uma chegada corresponde a uma entidade. É atribuída a cada entidade o seu tempo de processamento em cada uma das estações. Os outros atributos permitem identificar o tipo de variante criado e determinar o tempo de ciclo da entidade/variante no sistema (atribuído quando a entidade chega ao sistema e contabilizado aquando da sua saída). Outro atributo muito importante é aquele que permite determinar o tempo de ciclo da unidade no sistema, atribuído à chegada da entidade e contabilizado na sua saída. Para modelar o percurso de cada entidade no sistema os autores utilizam o módulo *Route*, que envia as entidades para o próximo passo do seu processamento dependendo dos seus atributos.

Algumas entidades necessitam de ser agrupadas antes do seu processamento numa estação. Para este fim, os autores recorrem ao módulo *Batch* para que as unidades aguardem até que seja atingido o tamanho do *batch* indicado no atributo de cada variante, continuando então o seu processamento pelo sistema, agora como uma entidade diferente. Uma vez que cada tipo de motor tem o seu sub-modelo de montagem final, *rotors* e *stators* são juntos através de um módulo *Match*, de acordo com o tipo de motor e de variante, antes da passagem a esse sub-modelo. No fim do processo, no sub-modelo de expedição, um bloco *Record* é utilizado para contabilizar o número total de motores produzidos de cada tipo e de cada variante, bem como o tempo de ciclo médio das entidades no sistema. Os autores verificam o modelo assegurando-se que as entidades percorrem o sistema de forma correcta e determinam o período de aquecimento necessário

para o sistema atingir o *steady-state* recorrendo ao método de Welch. Estimado um período de aquecimento de 10 dias, os autores simulam o modelo para 110 dias, a fim de recolher estatísticas para 100 dias de simulação.

Os autores estudam o comportamento do sistema para diferentes procura diárias, obtendo informação sobre a capacidade de resposta do mesmo e da existência de possíveis *bottlenecks*. Os resultados permitem identificar as estações problemáticas para cada nível de procura, e permitem concluir que o sistema não consegue satisfazer as necessidades apenas para o nível mais elevado de procura. Para este nível, os autores propõem uma redução no tempo de processamento de uma máquina, identificada como principal *bottleneck*, como forma de satisfazer a procura. Os autores acrescentam a necessidade de investigar os possíveis ganhos em não produzir todas as variantes de motor todos os dias, isto é, de reduzir os tempos gastos em *set-up* de máquinas ao mudar menos vezes de variante.

C. “Simulation Modeling of Automatic Production Lines with Intermediate Buffers”

O estudo de Heshmat, El-Sharief e El-Sebaief (2013) procura determinar a dimensão dos supermercados de produção que elimina os pontos de estrangulamento existentes numa linha de produção de cimento. O modelo de simulação desenvolvido em Arena é utilizado para identificar e testar os pontos que estão a causar congestionamento em diferentes áreas da linha de produção.

Para a modelação da linha de produção, são recolhidos dados sobre todas as estações de trabalho, nomeadamente capacidades de produção, tempos de processamento e as capacidades dos supermercados intermédios. Para modelar as falhas das máquinas, é recolhida informação sobre as intervenções de manutenção efectuadas no último ano, sendo os dados recolhidos analisados e ajustados a uma distribuição de probabilidade que melhor reflecte a fiabilidade de cada máquina. Os autores consideram um período de aquecimento de 5 horas, instante a partir do qual consideram que o sistema atinge o ponto de equilíbrio. Mais uma vez, os autores consideram como forma de validar o modelo a validação estatística, isto é, a comparação dos *outputs* do modelo e do sistema real. Dada a diferença de 250 toneladas entre a produção diária do modelo (5450) e a do sistema real (5200), os autores consideram o modelo de simulação válido. Após um período de simulação de 13 dias, os resultados identificam os pontos

de estrangulamento da linha de produção e indicam a taxa de utilização de cada estação e a capacidade dos supermercados.

Relativamente à dimensão dos supermercados intermédios, os autores analisam os resultados obtidos após a simulação e observam que a estação que apresenta o supermercado de maior dimensão é o forno isolador (*Kiln*), com o valor máximo simulado de 108 toneladas. Dado que a capacidade deste supermercado é de 500 toneladas, os autores calculam que podia ser reduzido em 78% sem perda de desempenho da linha de produção.

Para resolver os pontos de estrangulamento da linha, é proposto um novo modelo de simulação que é simulado durante 13 dias, sendo realizadas 15 replicações. Este novo modelo contempla um aumento na capacidade de produção do forno isolador e a passagem de 2 para 3 turnos por dia do funcionamento de algumas estações de trabalho. Implementadas estas alterações, os autores afirmam que o aumento na produção de cimento é de aproximadamente 15 %.

Na Tabela 2.1 são apresentados estes e outros casos de estudo onde a técnica de simulação é utilizada como ferramenta de análise de sistemas produtivos, recorrendo ao *software* Arena.

Tabela 2.1 - Exemplos de aplicação do Arena na simulação de sistemas de produção.

Autor	Aplicação
Abed (2008)	<i>A Simulation Study to Increase the Capacity of a Rusk Production Line</i> Análise de Pontos de Estrangulamento Melhoria da Produtividade
Hecker, Hussein & Becker (2010)	<i>Analysis and Optimization of a Bakery Production Line using Arena</i> Planeamento da Produção Melhoria da Produtividade
McDonald, Van Aken & Ellib (2012)	<i>Utilizing simulation to evaluate production line performance under varying demand conditions</i> Análise de Pontos de Estrangulamento Análise de Produtividade
Heshmat <i>et al.</i> (2013)	<i>Simulation Modeling of Automatic Production Lines with Intermediate Buffers</i> Análise de Pontos de Estrangulamento Dimensionamento de Supermercados
Pandian & Ali (2014)	<i>The Effects of System Failures in a Robotic Assembly Line Simulation Modeling and DOE Analysis</i> Análise de Fiabilidade do Sistema Análise de Sensibilidade

2.4.2 Outras Áreas

Apesar do presente trabalho se enquadrar no âmbito dos sistemas de produção, a observação do uso da simulação em diferentes áreas de actividade demonstra a versatilidade desta técnica. A simulação tem sido, nos anos mais recentes, a ser utilizada em áreas tão diferentes como a logística industrial, o serviço hospitalar ou o contexto militar. Embora sejam incontáveis as aplicações da simulação nos mais variados sectores de actividade, os estudos que se resumem de seguida são importantes pois demonstram a gama de aplicações da simulação, os diferentes problemas que podem ser analisados e os resultados possíveis de alcançar através desta técnica.

Kose *et al.* (2003) utilizam a simulação no estudo do tráfego marítimo ao longo do estreito de Istambul, Turquia. Os autores simulam o estado actual do tráfego neste estreito, e investigam as alterações ao tráfego quando o estreito é sujeito a diferentes cenários.

O trabalho de Nsakanda e Turcotte (2004) aplica a técnica de simulação na análise e avaliação das operações de carga no aeroporto Toronto Pearson, no Canadá. Os autores desenvolvem uma ferramenta baseada na simulação que permite avaliar e comparar quantitativamente diferentes práticas e procedimentos relacionados com as operações de carga aérea, como por exemplo uma alteração na capacidade de carga ou no serviço prestado.

Boginski *et al.* (2007) constroem um modelo de simulação para analisar as operações e a utilização de recursos numa unidade hospitalar. Os autores utilizaram o *software* Arena para analisar o fluxo de pacientes no hospital e, assim, identificar potenciais situações de atrasos relacionados com a utilização de equipamentos. Os resultados obtidos identificam a maternidade como sendo a unidade onde os atrasos são mais significativos em condições de fluxo elevado de pacientes.

Chan e Prakash (2012) aplicam a simulação no contexto da gestão da cadeia de abastecimento. A principal contribuição deste trabalho de investigação é a demonstração do impacto de diferentes estratégias de colaboração entre entidades na cadeia de abastecimento na redução dos custos totais associados à gestão de inventário. Os autores utilizam o *software* Arena no seu estudo e

chegam à conclusão de que a colaboração lateral, composta por práticas de colaboração horizontal e vertical, é de todas a mais benéfica para todas as entidades envolvidas.

Estes e outros exemplos de aplicação da simulação em diversas áreas de actividade são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2- Exemplos de aplicação da simulação em diferentes áreas de actividade.

Autor		Área de Aplicação
Kose <i>et al.</i> (2003)	<i>Simulation of Marine Traffic in Istanbul Strait</i>	Tráfego Marítimo
Nsakanda & Turcotte (2004)	<i>Air Cargo Operations Evaluation and Analysis Through Simulation</i>	Operações Aeroportuárias
Cho & Eppinger (2005)	<i>A Simulation-Based Process Model for Managing Complex Design Projects</i>	Gestão de Projectos
Filho & Cruz (2007)	<i>Using Simulation to Predict Market Behavior for Outbound Call Centers</i>	Call-Centers
Chapman, Hamilton. D, Box, Kuhr, MacDonald & Hamilton. (2007)	<i>Simulation of Army Unmanned Aerial Vehicle Communications</i>	Operações Militares
Boginski <i>et al.</i> (2007)	<i>Simulation and Analysis of Hospital Operations and Resource Utilization Using RFID Data</i>	Operações Hospitalares
Vasumathi & Dhanavanthan (2010)	<i>Application of Simulation Technique in Queuing Model for ATM Facility</i>	Filas de Espera
Chan & Prakash (2012)	<i>Inventory Management in a Lateral Collaborative Manufacturing Supply Chain: a Simulation Study</i>	Gestão da Cadeia de Abastecimento

3. Caso de Estudo

No presente capítulo é descrito o caso de estudo em análise neste trabalho. É apresentada a empresa *Delphi Automotive Systems* Portugal e, em particular, a unidade onde foi realizado o estudo, situada no Seixal. São ainda apresentados os modelos produzidos, os seus fluxos de processo e o actual layout da linha. Finalmente, é descrito o funcionamento actual da linha e o seu desempenho.

3.1 Delphi Automotive Systems Portugal

A *Delphi Automotive Systems* Portugal pertence ao Grupo *Delphi*, o maior fornecedor a nível mundial de componentes electrónicos e sistemas de transporte para a indústria automóvel. O grupo está presente em 30 países, integrando cerca de 101 mil funcionários nas suas 270 unidades, 16 mil dos quais engenheiros e cientistas.

A história da *Delphi* inicia-se em 1994, com a criação da *Automotive Components Group* (ACG), por parte da *General Motors*. Em 1995, a recém criada ACG é renomeada para *Delphi Automotive Systems*. A introdução de práticas de produção *lean* é feita em 1996, um ano antes da *General Motors* e a *Hughes Defence* concordarem em transferir a *Delco Electronics* da *Hughes* para a *Delphi*. Passados dois anos, em 1999, a *Delphi Automotive Systems* torna-se totalmente independente da *General Motors*.

O grupo *Delphi* divide-se em 5 grandes segmentos:

- *Electrical/Electronic Architecture* (Arquitetura Eléctrica e Electrónica);
- *Electronics & Safety* (Segurança e Electrónica);
- *Powertrain Systems* (Sistemas de Tracção);
- *Thermal Systems* (Sistemas de Gestão Termal);
- *Product & Service Solutions* (Soluções de Produto e Serviço).

Actualmente, a *Delphi* detêm quatro unidades em território português. Duas *Delphi* – P, unidades do segmento *Product & Service Solutions*, em Lisboa e Castelo Branco. Em Braga, a *Delphi* – E&S (do segmento *Electronics & Safety*) é uma unidade especializada na produção de peças de plástico, peças electrónicas e

sistemas de navegação, e na montagem final de auto-rádios. Por fim, o grupo conta ainda com a *Delphi-PT* (do segmento *Powertrain Systems*) situada no Seixal.

3.1.1 Complexo Fabril do Seixal

“A nossa Visão...Seremos reconhecidos pelos nossos clientes e acionistas como o melhor fabricante europeu de ignições, sensores e atuadores, respeitando os princípios de cidadania organizacional.”

Delphi Seixal

A unidade de produção do Seixal está integrada no segmento *Powertrain Systems* do grupo *Delphi*, e é especializada na produção de ignições, sensores e atuadores para o mercado automóvel. A *Delphi Seixal* emprega aproximadamente 650 colaboradores, e as suas instalações ocupam uma área de 12.500 M² (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Instalações da Delphi no Seixal.

Na *Delphi* do Seixal são produzidos, anualmente, 7 milhões de ignições, 3 milhões de atuadores e 2 milhões de sensores. Actualmente, a produção é quase na totalidade exportada, de modo a satisfazer as necessidades de 30 dos maiores construtores automóveis a nível mundial, de entre os quais:

- *General Motors;*
- *Mercedes-AMG;*
- *BMW;*
- *Opel;*
- *Nissan;*

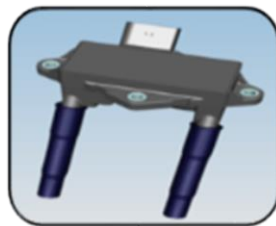
- *Mistubishi;*
- *Volvo;*

3.2 Linha de Produção em Análise

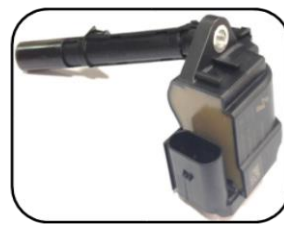
A linha que é alvo de análise no presente trabalho faz parte do processo de produção de 4 modelos de bobinas de ignição. Os diferentes modelos, as especificações do processo de produção e o funcionamento actual da linha são descritos no presente sub-capítulo.

3.2.1 Modelos Produzidos

Os 4 modelos de bobinas produzidos na linha da *Delphi* (Figura 3.2) pertencem à família de produtos denominada *Plug Top Coil Multispark*, e têm como cliente final a construtora alemã *Daimler/AMG*.



M177



M274



M276



M279

Figura 3.2 – Modelos de bobinas de ignição produzidos na linha.

As bobinas de ignição fornecem a energia eléctrica necessária à ignição de misturas de ar e combustível que ocorrem no interior de um motor de combustão. As bobinas do tipo *Multispark*, em particular, representam um importante desenvolvimento na tecnologia de sistemas de ignição. Após a primeira faísca, as bobinas do tipo *Multispark* recarregam e são capazes de imediatamente voltar a fornecer energia de ignição. Esta maior frequência e duração das faíscas de

ignição contribui para a optimização do consumo de combustível e para um melhor desempenho do motor.

Na Tabela 3.1 apresentam-se os volumes de produção dos 4 modelos de bobinas de ignição previstos para os próximos anos.

Tabela 3.1- Volumes anuais de produção previstos por Modelo.

Modelos de bobinas de ignição	Volumes de produção previstos (milhares de unidades)			
	2014	2015	2016	2017
M274	1 511 596	2 030 660	2 026 736	1 897 284
M276	982 716	884 400	1 250 400	1 257 600
M279	38 940	51 480	45 480	43 200
M177	5 720	56 000	89 980	91 200

O modelo de bobinas de ignição M177 iniciou recentemente a produção nas instalações da *Delphi*, estando previsto um aumento da produção no decorrer dos próximos anos. Na actualidade, o modelo de bobinas de ignição encontra-se num período de produção *low volume* ou fase de protótipo, caracterizado por níveis de produção muito reduzidos. Por esta razão, o volume de produção do modelo M177 não será considerado no estudo de simulação a realizar.

Apesar de o seu processo de produção estar já completamente implementado na linha, a produção do modelo de bobinas de ignição M279 também não será simulada no presente trabalho. Foi decidido, em conjunto com o responsável pelo acompanhamento do presente trabalho na *Delphi*, que os baixos valores de produção previstos para este modelo de bobinas de ignição possibilitam o estudo da linha mesmo não considerando as estações dedicadas à produção deste modelo.

Mesmo não sendo considerados no modelo de simulação a construir, a produção destes dois modelos de bobinas de ignição irá afectar a produção dos outros dois modelos em estudo, M274 e M276, uma vez que existirá uma menor disponibilidade de algumas estações de trabalho para o processamento destes

dois modelos de bobinas devido às necessidades de produção dos dois modelos não considerados.

3.3.2 Fluxo de Processos

Os processos desenvolvidos na linha de produção da *Delphi* (Figura 3.3) são comuns aos dois modelos de bobina em estudo.

A produção das bobinas de ignição inicia-se com a moldagem dos componentes plásticos que entram no processo, como os *Spools* Primários e Secundários, as *Cases* ou os componentes necessários à montagem da Bota. Este processo inicial decorre num local diferente da fábrica, a zona dos plásticos.

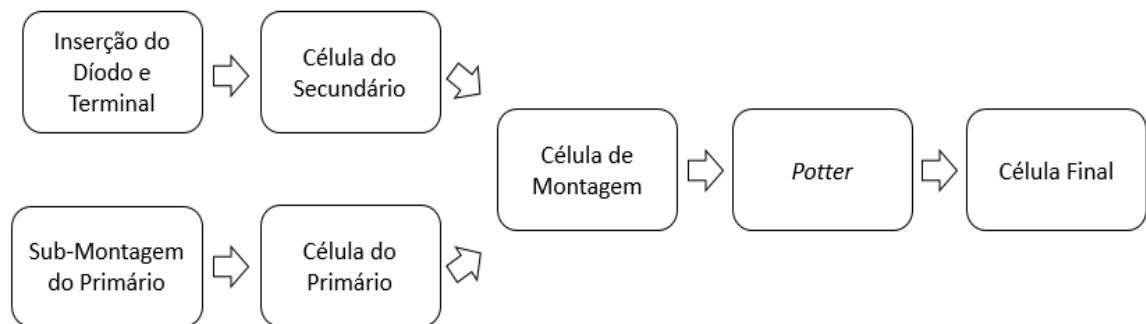


Figura 3.3 – Fluxo de processos das bobinas de ignição.

A linha de produção em estudo inicia-se com a Inserção do Díodo e Terminal no *Spool* plástico do Secundário. Após esta fase, o componente anteriormente formado é transferido para a célula do Secundário, onde o *Spool* Secundário é bobinado. A Figura 3.4 ilustra o fluxo de processos do modelo de bobina M274.

O processamento do Primário ocorre em paralelo com o do Secundário. A fase de bobinagem do Primário é precedida de uma pré-montagem de componentes, provenientes da secção dos plásticos, para dar origem ao *Spool* Primário. Na célula de montagem, os *Spools* Primários e Secundários bobinados são montados na *Case*, juntamente com outros componentes. Dos componentes utilizados na célula de montagem, apenas a *Case* é produzida nas instalações da *Delphi*, sendo os restantes entregues por fornecedores.

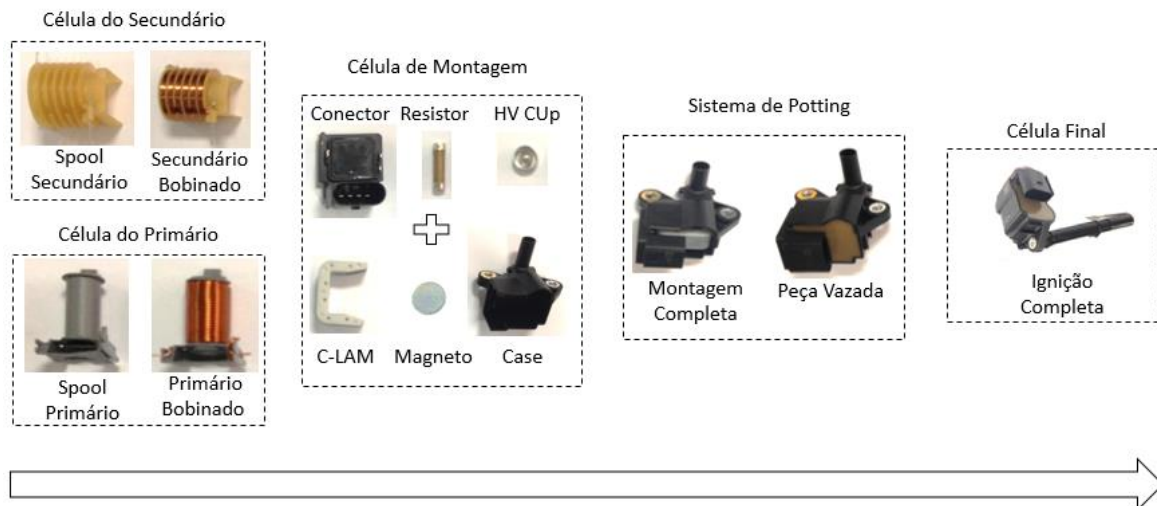


Figure 3.4 – Fluxo de processos do modelo de bobina M274.

O fluxo de processos necessários à produção do modelo de bobina M276 é ilustrado na Figura 3.5. As grandes diferenças relativamente ao modelo de bobina M274 são os formatos do Conector e da *Case*, na montagem, e também o formato da Bota.

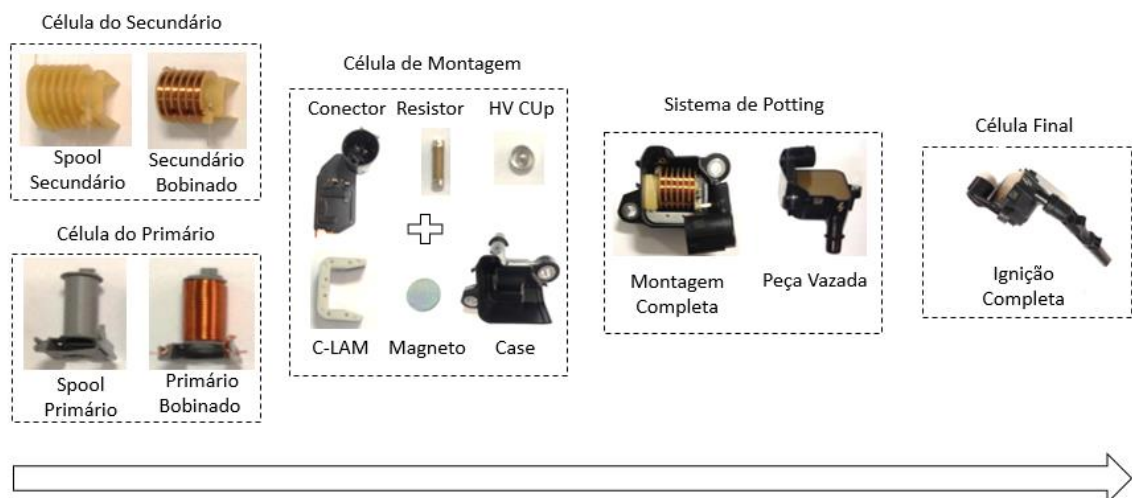


Figure 3.5 – Fluxo de processos do modelo de bobina M276.

Quando a montagem está completa, as peças aguardam o processamento na *Potter*. A *Potter* é a única estação de trabalho que processa todas os modelos de bobinas. Nesta fase, uma resina denominada *Epoxy* é misturada com um endurecedor e a mistura vazada para as peças montadas. Os tabuleiros de peças montadas percorrem um circuito de três fornos diferentes, em sequência, com uma permanência, por tabuleiro, de aproximadamente 2h20 min em cada forno.

No final deste processo, os lotes de tabuleiros são então colocados em supermercados de produção, à saída da *Potter*, para aguardarem o seu processamento na célula final. Na célula final é realizada a montagem da bota na peça vazada resultante da *Potter*.

3.3.3 Layout da Linha de Produção

Na linha de produção da *Delphi* existem estações de trabalho dedicadas à produção de apenas um tipo de bobina, mas também outras afectas à produção de diferentes modelos de bobinas. A Figura 3.6 representa o *layout* da linha em estudo. No *layout* apresentado são identificadas as 9 estações de trabalho da linha que são alvo do estudo de simulação (Tabela 3.2).

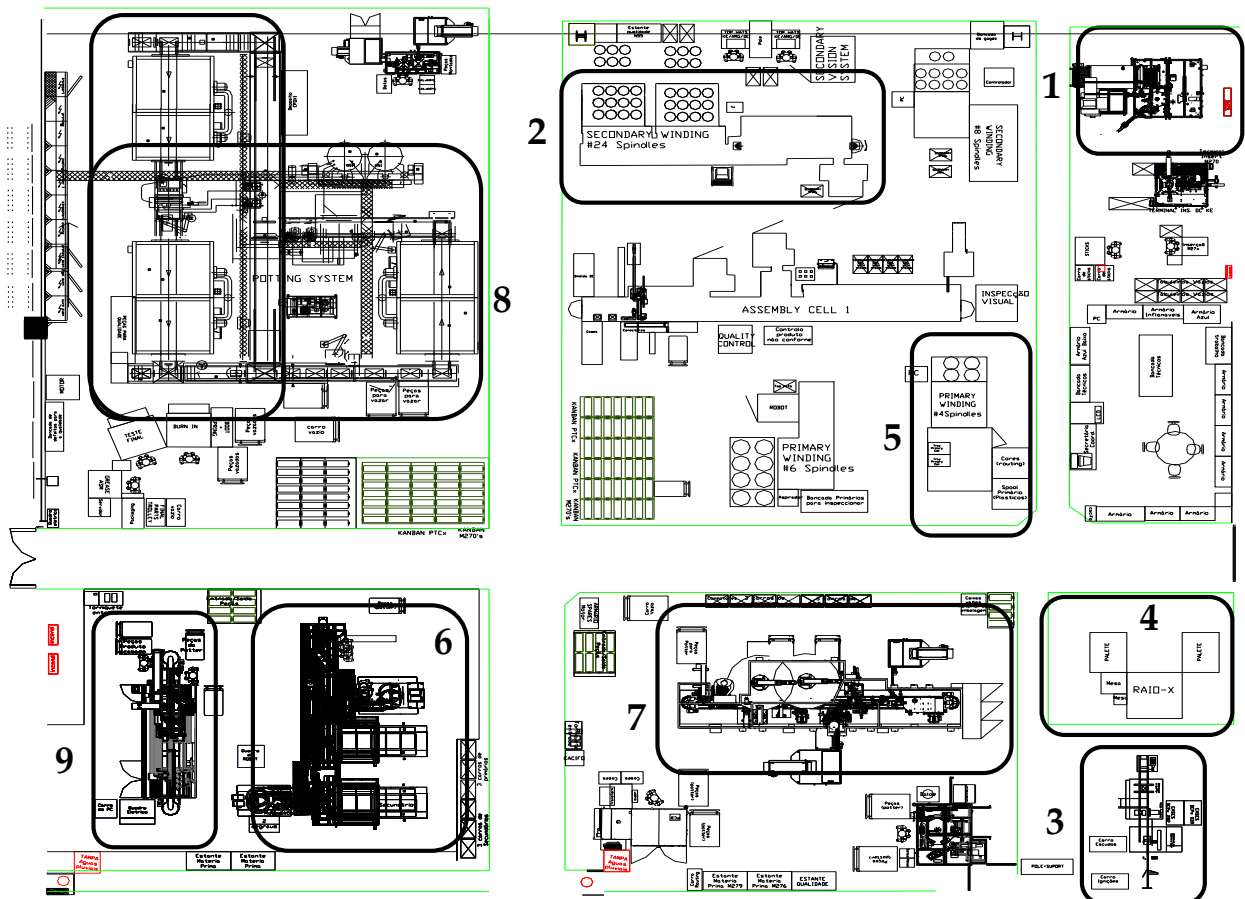


Figura 3.6 - Layout da linha de produção da *Delphi*.

Tabela 3.2 - Estações de trabalho da linha em estudo.

Estação	Fase do Fluxo de Processos	Modelo Processado
1	Inserção do Díodo e Terminal	M274 e M276
2	Célula do Secundário	M177, M274, M276 e M279
3	Sub-Montagem do Primário	M177, M274, M276 e M279
4	Célula do Primário	M274
5	Célula do Primário	M177, M276 e M279
6	Célula de Montagem	M274
7	Célula de Montagem	M117, M276 e M279
8	Potter	M177, M274, M276 e M279
9	Célula Final	M274 e M276

3.3.4 Funcionamento Actual da Linha

Para tornar as condições de replicação do modelo de simulação semelhantes às condições reais de funcionamento da linha, recolheu-se informação sobre a duração dos turnos de trabalho e dos tempos de paragem programados para as estações de trabalho (Tabela 3.3). Apesar da maioria das estações de trabalho interromper a produção durante os intervalos para refeições, algumas das estações não o fazem e continuam a funcionar existindo, nestes casos, apenas uma troca nos operadores que supervisionam a estação.

Tabela 3.3 - Turnos de trabalho e paragens programadas.

1º Turno de Trabalho	00.00h – 08.00h
2º Turno de Trabalho	08.00h – 16.00h
3º Turno de Trabalho	16.00h – 00.00h
Intervalo de Almoço	13.00h – 13.30h
Intervalo para Jantar	20.00h – 20.30h
Pausas para Outras Refeições	15 Minutos por turno
Aquecimento Articular	5 Minutos no início de cada turno

Para modelar a linha da *Delphi* é necessário saber com detalhe as condições de funcionamento de cada estação de trabalho. Assim, seguidamente, é sumarizada a informação relativa a cada uma das 9 estações de trabalho.

Estação 1 - Inserção do Díodo e Terminal

A estação de trabalho Inserção do Díodo e Terminal alimenta a Célula do Secundário com *spools* prontos a bobinar. Nesta fase inicial do processo, os componentes que são o *output* da estação não estão ainda diferenciados em M274 ou M276, pelo que podem ser denominados como *spool* secundário para bobinar. A estação de trabalho produz lotes de componentes, até atingir o limite máximo de 6 lotes no supermercado de peças a jusante que alimenta o Secundário. Esta alimentação é realizada por meio da movimentação, por parte do operador responsável pela estação de trabalho, de um lote de cada vez. No entanto, o supermercado ao atingir os 2 lotes (ponto de encomenda), vai despoletar o reinício da produção na estação. Na Tabela 3.4 está sumarizada a informação referente às especificações da estação de trabalho Inserção do Díodo e Terminal.

Tabela 3.4 – Especificações da estação Inserção do Díodo e Terminal.

Turnos de Trabalho	1º e 2º
Limite Máximo do Supermercado	6 Lotes
Ponto de Encomenda	2 Lotes
Nº Tabuleiros por Lote	14
Nº Peças por Tabuleiro	60
Tempo Processamento (Min/Tab)	4

Estação 2 - Célula do Secundário

A Célula do Secundário recebe lotes de secundários para bobinar provenientes da estação de Inserção do Díodo e Terminal. Considera-se que a Célula do Secundário está disponível para a produção de M274 e M276 apenas dois turnos por dia. A estação produz lotes de secundários bobinados até atingir o limite máximo de 6 lotes no banco de peças a jusante, responsável pela alimentação das duas Células de Montagem. Esta alimentação é realizada por meio da movimentação de um lote de cada vez, mas quando o supermercado atinge os 3

lotes é reiniciada a produção na estação de trabalho. Na Tabela 3.5 é sumarizada a informação referente à estação Célula do Secundário.

Tabela 3.5 – Funcionamento da Célula do Secundário.

Turnos de Trabalho	1º e 2º
Limite Supermercado	6 Lotes
Ponto de Encomenda	3 Lotes
Tabuleiros por Lote	14
Peças por Tabuleiro	60
Tempo Processamento (Min/Tab)	5

Estação 3 - Sub-Montagem Primário

A estação de trabalho Sub-Montagem Primário alimenta as duas Células do Primário. O *output* da estação não é ainda diferenciado, pelo que pode ser transferido para qualquer uma das estações Célula do Primário a jusante. A estação produz até atingir o limite máximo estabelecido de 2 lotes no supermercado. Atingido este limite, a produção é interrompida, sendo retomada apenas quando um dos lotes, ou os dois, for movimentado para uma das estações Célula do Primário. Na Tabela 3.6 está sumarizada a informação referente à estação Sub-Montagem Primário.

Tabela 3.6 – Funcionamento da Sub-Montagem do Primário.

Turnos de Trabalho	1º e 2º
Limite Supermercado	2 Lotes
Ponto de Encomenda	1 Lote
Tabuleiros por Lote	14
Peças por Tabuleiro	84
Tempo Processamento (Min/Tab)	6

Estação 4 - Célula do Primário M274

Provenientes da estação de Sub-Montagem, os primários são bobinados na estação de trabalho Célula do Primário M274. A estação interrompe a produção ao atingir os 2 lotes no supermercado, e reinicia quando subsistir apenas um. A alimentação da estação de trabalho Célula de Montagem M274 dá-se pela movimentação de um lote de cada vez. A Tabela 3.7 sumariza a informação referente a esta estação.

Tabela 3.7 – Funcionamento da Célula do Primário M274.

Turnos de Trabalho	1º e 2º
Limite Supermercado	2 Lotes
Ponto de Encomenda	1 Lote
Tabuleiros por Lote	14
Pecas por Tabuleiro	84
Tempo Processamento (Min/Tab)	9

Estação 5 - Célula do Primário M276

Como descrito na estação de trabalho Célula do Primário M274, provenientes da estação de Sub-Montagem, os primários são bobinados passando o componente resultante a denominar-se Primário M276. Embora programado para funcionar um pouco mais que 2 turnos, considera-se que apenas 2 são dedicados à produção de Primários M276, sendo o restante tempo disponível utilizado para a produção de Primários M177 e M279 e para a manutenção e limpeza das máquinas. A estação interrompe a produção ao atingir os 2 lotes no supermercado e reinicia a produção quando o supermercado tiver apenas um. A alimentação da estação de trabalho Célula de Montagem M276 dá-se pela movimentação de um lote de cada vez. A Tabela 3.8 resume a informação referente a esta estação de trabalho.

Tabela 3.8 – Funcionamento da Célula do Primário M276.

Turnos de Trabalho	1º e 2º
Limite Supermercado	2 Lotes
Ponto de Encomenda	1 Lotes
Tabuleiros por Lote	14
Peças por Tabuleiro	84
Tempo Processamento (Min/Tab)	14

Estação 6 - Célula de Montagem M274

A montagem dos primários e secundários M274 com o Conector, a Case e outros componentes menores é realizada na estação de trabalho Célula de Montagem M274. À saída da estação, as peças são agrupadas em tabuleiros de 30 peças, sendo um lote constituído por 19 tabuleiros. Assim, cada lote contém 570 peças montadas. Após a montagem, os lotes são transferidos para um supermercado comum às duas montagens, com capacidade para 10 lotes de peças montadas. A Tabela 3.9 apresenta a principal informação referente a esta estação.

Tabela 3.9 – Funcionamento da Célula de Montagem M274.

Turnos de Trabalho	1º e 2º
Limite Supermercado	10 Lotes
Tabuleiros por Lote	19
Peças por Tabuleiro	30
Tempo Processamento (Seg/Peça)	7,5

Estação 7 - Célula de Montagem M276

A estação de trabalho Célula de Montagem M276 é responsável pela montagem dos primários e secundários com outros componentes para formar uma montagem completa M276. O seu funcionamento é em tudo idêntico ao da Célula de Montagem M274. O supermercado antes da *Potter* tem capacidade para 10 lotes e é partilhado pelas duas montagens. A atribuição do espaço em

supermercado a cada tipo de bobina depende das procuras semanais pelo que é variável. A Tabela 3.10 sumariza a informação referente a esta estação.

Tabela 3.10 – Funcionamento da Célula de Montagem M276.

Turnos de Trabalho	1º e 2º
Limite Supermercado	10 Lotes
Tabuleiros por Lote	19
Peças por Tabuleiro	30
Tempo Processamento (Seg/Peça)	7,5

Estação 8 - Potter

Apesar de trabalhar praticamente os 3 turnos diários, considera-se que apenas no 2º e 3º turnos realiza o processamento dos dois modelos de bobinas em estudo.

O processo inicia-se com a entrada de um tabuleiro de 30 peças provenientes das montagens para um forno de duas câmaras, cada uma com capacidade para 30 tabuleiros e em que cada tabuleiro percorre as duas câmaras num processo que demora cerca de 2h e 20 min. À medida que saem do primeiro forno, os tabuleiros passam por uma câmara de vazamento, processo que demora cerca de 3 minutos por tabuleiro. Após este processo, cada tabuleiro passa ainda por outros dois fornos, o Forno de Gel e o Forno de Cura, permanecendo cerca de 2h e 20 min em cada um. À saída da *potter*, as peças que constituem os tabuleiros são transferidas para tabuleiros com capacidade para 60 peças. Cada lote de 9 ou 10 tabuleiros aguarda num supermercado à saída da *potter* para ser processado na Célula Final. Este supermercado tem capacidade para um máximo de 14 lotes, 7 lotes de cada tipo de bobina.

Os tempos de processamento nesta estação são idênticos para os dois modelos de bobina. Na Tabela 3.11 é sumariada a informação referente a esta estação.

Tabela 3.11 – Funcionamento da Potter.

Turnos de Trabalho	2º e 3º
Limite Supermercado	7 Lotes M274 e 7 Lotes M276
Ponto de Encomenda	3 Lotes M274 e 3 Lotes M276
Peças por Tabuleiro (Potter)	30
Peças por Tabuleiro (Supermercado)	60
Tabuleiros por Lote (Supermercado)	9 / 10
Tempo Processamento Câmara Vazamento (Seg/Peça)	6
Tempo Processamento Fornos (Min/Tab)	140

Estação 9 - Célula Final

A estação de trabalho Célula Final tem como cliente a área de Logística da fábrica. Nesta estação são montadas as peças provenientes da *potter* com os respectivos tipos de Botas, para assim formar o produto final, a bobina de ignição M274 ou M276. Os componentes finais são agrupados em tabuleiros de 16 peças, e cada lote de 22 tabuleiros é enviado então para a Logística. Na Tabela 3.12 que se segue é apresentada a principal informação referente a esta estação.

Tabela 3.12 – Funcionamento da Célula Final.

Turnos de Trabalho	1º e 2º
Limite Supermercado	Procura Diária
Peças por Tabuleiro	16
Tabuleiros por Lote	22
Tempo Processamento (Seg/Peça)	6,8

3.3.5 Desempenho Actual da Linha

Foram recolhidos valores que caracterizam o desempenho das estações de trabalho da linha da *Delphi* no que diz respeito ao número de peças produzidas e à percentagem de utilização da estação durante o mês de Fevereiro de 2014. Os valores foram disponibilizados pelo Departamento de Engenharia e Produção da *Delphi*.

O desempenho de cada estação de trabalho é registado, em cada turno de trabalho, pelo operador responsável por essa estação. A *Delphi* utiliza turnos de trabalho de 8 horas, mas o número de turnos programados para o funcionamento de uma estação de trabalho é função das necessidades de produção.

Na Tabela 3.13 é apresentado o desempenho das 9 estações de trabalho que constituem a linha, durante o mês de Fevereiro de 2014.

Tabela 3.13 – Desempenho da linha de produção para o mês de Fevereiro de 2014.

Estação de Trabalho	Peças Produzidas	Utilização da Estação (%)
Inserção Diodo e Terminal	135 231	86.0
Célula do Secundário	124 575	78.0
Células do Primário	141 147	57.5
Célula de Montagem M274	69 150	76.7
Célula de Montagem M276	53 385	57.9
Potter	153 039	92.4
Célula Final	116 342	87.3

Relativamente à tabela apresentada, importa referir os seguintes aspectos:

- Os dados foram obtidos durante 17 dias de trabalho;
- Não foi possível obter dados sobre o funcionamento da estação Sub-Montagem Primário, visto na altura ainda não serem mantidos registos diários de produção;
- O desempenho das duas Células do Primário é apresentado como um só.

- A utilização da estação indica a percentagem do tempo trabalhado que é efectivamente utilizada na produção de componentes.
- Embora em número reduzido, algumas das peças produzidas nas estações dizem respeito aos dois modelos que não são considerados no modelo de simulação.

A informação contida na Tabela 3.13, apresenta os valores que serão utilizados na fase de validação do modelo de simulação a desenvolver. Nesta fase, os resultados obtidos após a replicação do modelo desenvolvido serão comparados, para cada estação de trabalho, com os valores obtidos para o mês de Fevereiro de 2014, possibilitando assim uma análise à capacidade do modelo de simulação em apresentar resultados semelhantes ao sistema real.

4. Tratamento de Dados e Modelo Conceptual

No presente capítulo são tratados estatisticamente alguns dos dados recolhidos na linha de produção da *Delphi*. Após o tratamento dos dados recolhidos, é construído o modelo conceptual da linha e são apresentados os pressupostos assumidos e simplificações realizadas no funcionamento da linha de produção.

4.1 Tratamento Estatístico de Dados

A maior parte dos sistemas reais contém uma ou mais fontes de aleatoriedade. De acordo com Law (2013), uma das mais importantes tarefas a realizar num estudo de simulação é a modelação dessas fontes de aleatoriedade recorrendo à distribuição de probabilidades mais apropriada. Para o mesmo autor, existem dois tipos de erros que são de grande importância quando se realiza a modelação de um *input* de simulação e que podem contribuir para o insucesso de um estudo de simulação, nomeadamente:

- Erro Nº1 – Fazer a substituição de um valor aleatório com determinada distribuição de probabilidade pela sua média.
- Erro Nº2 – Utilizar uma distribuição de probabilidade errada.

Estes dois tipos de erro podem produzir resultados de simulação errados. No primeiro caso, a variabilidade do *input* modelado através de uma distribuição de probabilidade, ao invés de ser utilizado o valor fixo da média, tem um efeito significativo no funcionamento dos sistemas, particularmente em sistemas com filas de espera, sujeitos a congestionamentos, como o que é analisado no presente trabalho. Por outro lado, a distribuição a utilizar é também de importância extrema. Segundo Law (2013), uma parte significativa dos estudos e manuais de simulação utilizam *inputs* normalmente distribuídos, apesar do autor afirmar, pela sua experiência, que este tipo de distribuição é raramente a mais apropriada para modelar as fontes de aleatoriedade.

O método que é utilizado neste trabalho para representar a aleatoriedade do sistema é o ajuste de distribuições estatísticas *standard* ao conjunto de dados

recolhidos na linha. Esta abordagem passa por encontrar, de entre um conjunto de distribuições de probabilidade teóricas standard (LogNormal, Exponencial, *Weibull*, entre outras), aquela que melhor se adequa a cada conjunto de dados e que, por isso, melhor representa a variabilidade presente nesse mesmo conjunto de dados.

O período de funcionamento e os tempos de paragem de cada estação de trabalho foram recolhidos durante o normal funcionamento da linha de produção sendo depois analisados estatisticamente para identificar as distribuições de probabilidades que melhor se ajustam aos dados recolhidos. A aplicação utilizada nesta análise foi o *Input Analyzer* do Arena. O *Input Analyzer* sugere a distribuição teórica de probabilidade, incluindo o valor do(s) parâmetro(s) da distribuição, que melhor representa o comportamento estocástico do conjunto de dados da variável em estudo, com base no erro quadrático do ajustamento. O *Input Analyzer* disponibiliza informação para os testes de hipóteses do Qui Quadrado e K-S.

4.1.1 Período de Funcionamento

Embora se conheça à partida o horário de funcionamento das estações de trabalho e a duração das paragens programadas, um dos mais importantes dados a recolher é a duração dos períodos de funcionamento das estações, isto é, durante quanto tempo cada estação funciona até que ocorra uma paragem não-programada. Para obter estes dados são tidos em conta registos diários de produção existentes em cada estação de trabalho, sendo contabilizados os tempos entre paragens não-programadas.

No Anexo 1 desta dissertação é apresentada uma amostra de observações de períodos de funcionamento da estação de trabalho Célula do Secundário. Os valores observados foram recolhidos em dias de trabalho diferentes para assim constituir uma amostra mais representativa do real funcionamento da estação.

O *Input Analyzer* foi utilizado para identificar a distribuição de probabilidades que melhor se ajusta ao comportamento dos dados apresentados no Anexo 1. O *software* apresenta um histograma dos dados e o sumário das características da distribuição de probabilidade que sugere usar com base no menor valor de erro quadrático (*Square Error*), os valores das estatísticas dos testes estatísticos de

ajustamento Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov e respectivos *corresponding p-values* e, ainda, as características descritivas da amostra de dados, nomeadamente, valores médio, mínimo, máximo e desvio padrão.

Para a estação de trabalho Célula do Secundário, o histograma da amostra de dados recolhidos e a restante informação fornecida pelo *Input Analyzer* são apresentados na Figura 4.1.

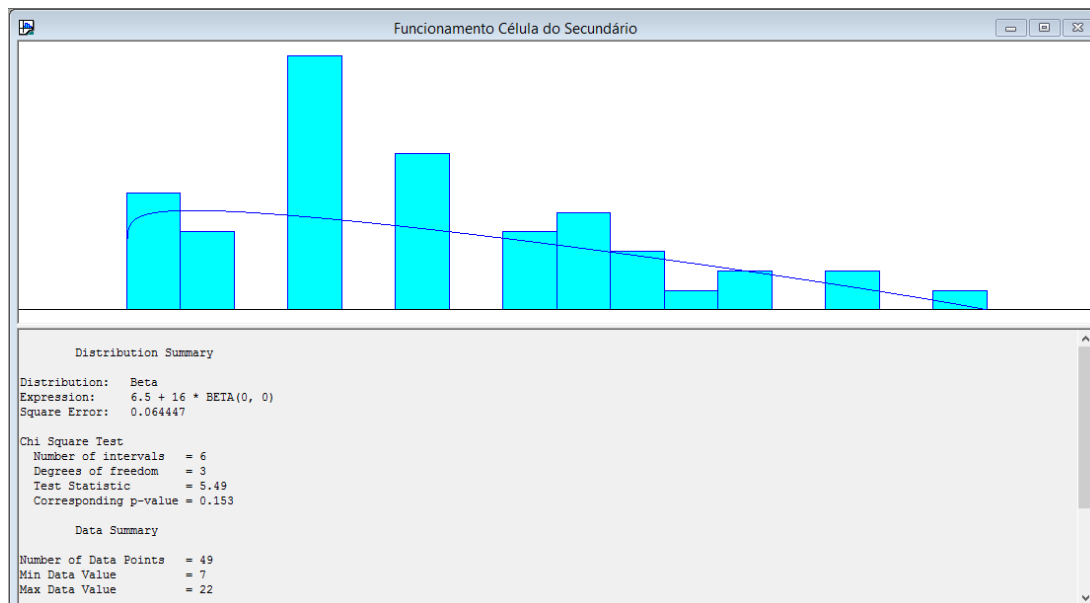


Figura 4.1 - Ajustamento sugerido pelo Input Analyzer para a Célula do Secundário.

A distribuição de probabilidades teórica que melhor se ajusta aos dados é a Beta. De modo a compreender o grau de ajuste das diferentes distribuições, é possível recorrer ao comando *Fit All Summary* (Figura 4.2).

The screenshot shows a window titled 'Fit All Summary' with the data file path 'C:\Users\Joao Calinas\'. It contains a table with the following data:

Function	Sq Error
Beta	0.0644
Poisson	0.065
Weibull	0.067
Gamma	0.069
Normal	0.0703
Triangular	0.0706
Erlang	0.0707
Exponential	0.0729
Lognormal	0.0802
Uniform	0.0812

Figura 4.2 - Grau de ajuste das diferentes distribuições.

Segundo Kelton *et al.* (2001) o erro quadrático é uma medida da qualidade do ajuste da distribuição aos dados, sendo que quanto maior é este valor mais distante a distribuição escolhida se encontra dos dados.

O *Input Analyzer* fornece o valor das estatísticas dos testes de ajustamento do Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov e o *p-value* que lhes está associado. A medida *corresponding p-value* é uma probabilidade e é de particular interesse. Se pretendermos um ajustamento com base num nível de confiança de 95%, um valor de *corresponding p-value* inferior a 5% (0,05) indica que a distribuição de probabilidade sugerida pelo *Input Analyzer* não representa convenientemente o conjunto de dados. Por outro lado, um valor de *corresponding p-value* muito superior não prova a existência de um bom ajuste da distribuição aos dados, mas também não rejeita essa possibilidade. Tendo em conta que o valor de *corresponding p-value* obtido para o teste do Qui-Quadrado foi de 0.153, não existem razões para duvidar da qualidade da distribuição enquanto representativa da aleatoriedade associada ao conjunto de dados recolhidos.

O mesmo procedimento foi aplicado para as restantes 8 estações de trabalho alvo de análise. As distribuições que melhor representam os dados recolhidos para cada estação e as suas expressões encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Distribuições estatísticas para os períodos de funcionamento de cada estação.

Estação de Trabalho	Distribuição	Expressão	Unidade
Inserção Diodo e Terminal	Poisson	POIS (15.5)	Min
Célula do Secundário	Beta	$6.5 + 11 \cdot \text{BETA}$ (1.08, 1.93)	Min
Sub-Montagem Primário	Beta	$2.5 + 28 \cdot \text{BETA}$ (0.786, 0.773)	Min
Célula do Primário M274	Beta	$4.5 + 31 \cdot \text{BETA}$ (1.13, 1.6)	Min
Célula do Primário M276	Beta	$7.5 + 33 \cdot \text{BETA}$ (0.798, 0.944)	Min
Célula de Montagem M274	Gamma	$2.5 + \text{GAMM}$ (8.61, 1.25)	Min
Célula de Montagem M276	Gamma	$2.5 + \text{GAMM}$ (9.69, 1.43)	Min
Potter	Beta	$10 + 270 \cdot \text{BETA}$ (0.433, 1.04)	Min
Célula Final	Beta	$6.5 + 24 \cdot \text{BETA}$ (0.953, 1.51)	Min

4.1.2 Tempos de Paragem

Tendo em conta a importância de estudar os tempos que interferem com o desempenho do sistema produtivo são analisados, de seguida, os tempos de paragem de produção das estações de trabalho. Para estes registos são contabilizados apenas os tempos de paragem não programados. Estas paragens podem ser causadas por problemas técnicos na estação, faltas de matéria-prima, falta de técnicos, entre outras razões. Tempo consumido pelos operadores em paragens programadas não é contabilizado como tempo de paragem de máquinas.

As distribuições estatísticas que melhor reproduzem os tempos de paragem recolhidos, por estação de trabalho, estão listadas na Tabela 4.2. Na determinação das distribuições de probabilidade apresentadas foi seguido o procedimento utilizado para a análise dos períodos de funcionamento das estações de trabalho da linha de produção.

Tabela 4.2 - Distribuições estatísticas que modelam os tempos de paragem.

Estação de Trabalho	Distribuição	Expressão	Unidade
Inserção Diodo e Terminal	Gamma	$1.5 + \text{GAMM} (1.53, 3.01)$	Min
Célula do Secundário	Beta	$1.5 + 11 \cdot \text{BETA} (1.47, 1.82)$	Min
Sub-Montagem Primário	Lognormal	$1.5 + \text{LOGN} (14.1, 22.2)$	Min
Célula do Primário M274	Lognormal	$1.5 + \text{LOGN} (9.55, 13)$	Min
Célula do Primário M276	Gamma	$1.5 + \text{GAMM} (5.8, 1.42)$	Min
Célula de Montagem M274	Erlang	$2.5 + \text{ERLA} (2.77, 2)$	Min
Célula de Montagem M276	Gamma	$2.5 + \text{GAMM} (11.2, 1.13)$	Min
Potter	Beta	$2.5 + \text{BETA} (1.48, 1.77)$	Min
Célula Final	Beta	$2.5 + 10 \cdot \text{BETA} (1.54, 2.17)$	Min

4.2 Modelo Conceptual

O modelo conceptual é, para muitos autores, o elemento mais importante de um estudo de simulação. Robinson (2010) define o modelo conceptual como uma

representação abstracta do sistema do ponto de vista do agente responsável pela simulação, funcionando como uma simplificação relativamente à complexidade do sistema real.

O modelo conceptual da linha de produção da *Delphi* é apresentado na Figura 4.3 e ilustra os fluxos de material que ocorrem na linha de produção, bem como a afectação de cada estação de trabalho aos diferentes modelos de bobina produzidos.

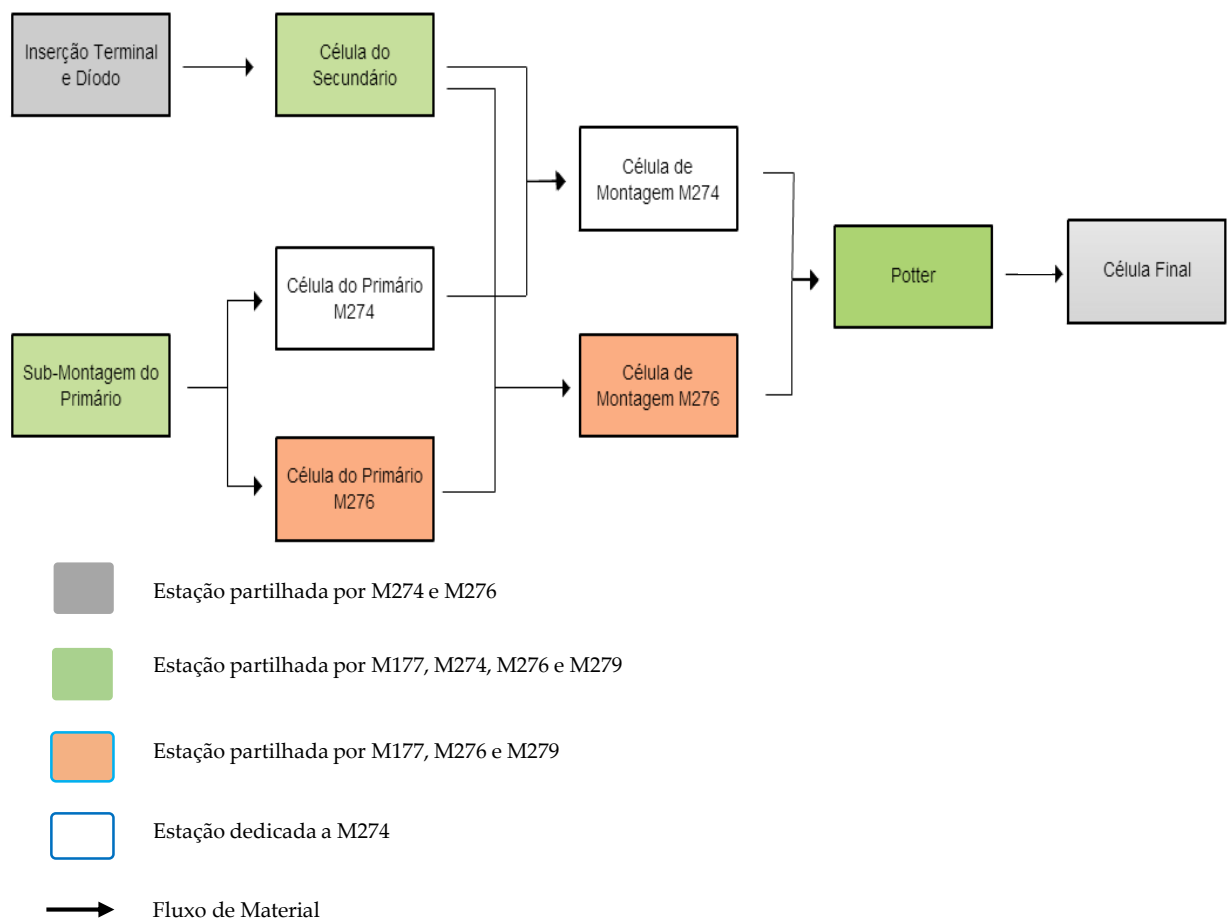


Figura 4.3- Modelo conceptual do sistema em estudo.

O modelo conceptual apresenta de uma forma simples a sequência de estações de trabalho que cada modelo de bobina de ignição percorre no sistema, desde as duas estações iniciais até à Célula Final. O modelo conceptual construído serve de base para a futura modelação em Arena do sistema em análise.

É importante referir que as estações de trabalho representadas no modelo conceptual são aquelas que se consideraram relevantes para estudar o sistema com o nível de detalhe e simplificação que se pretende, uma vez que existem outras estações, como a estação de Inserção do Díodo e Terminal para os modelos de bobinas M177 e M279 e a estação de Montagem da Bota para os modelos de bobinas M274 e M276, que pertencendo à linha de produção em análise não fazem parte do âmbito de estudo da presente dissertação.

4.2.1 Simplificações e Pressupostos Assumidos

Tendo em conta a complexidade da linha de produção e a incerteza associada aos ambientes de produção, foram assumidos os seguintes pressupostos e simplificações relativamente ao funcionamento da linha:

- **A produção dos modelos de bobinas M177 e M279 não é considerada;**

Como referido anteriormente, o reduzido volume de produção dos modelos M177 e M279 permite assumir que é possível estudar o comportamento da linha de produção sem incluir as estações dedicadas ao processamento destes dois modelos.

- **Não são considerados tempos de deslocação, de carregamento e de descarregamento;**

Uma vez que o carregamento e descarregamento das máquinas, assim como a deslocação de lotes entre estações de trabalho consecutivas, acontece enquanto as máquinas estão a trabalhar, considera-se que estes tempos não influenciam o desempenho da linha, no geral, e das estações de trabalho em particular.

- **Não são consideradas peças defeituosas e trabalhos de *re-work*;**

Após o processamento em cada estação, os tabuleiros ou lotes são rapidamente inspeccionados antes da passagem para o supermercado ou para a estação cliente. Uma vez que não se pretende, com este trabalho, uma análise aos indicadores de qualidade da linha e tendo em conta que o número de peças rejeitadas ao longo do processo é muito reduzido quando comparado com o número de peças conforme, o modelo de simulação não irá considerar os processos de inspecção, *re-work* de peças e as peças defeituosas.

- **Não é interrompida a alimentação de materiais plásticos e de materiais entregues por fornecedores;**

Considera-se que não ocorrem interrupções na alimentação de materiais plásticos às estações de trabalho, assim como nas entregas, por parte de fornecedores externos à *Delphi*, de materiais como os Conectores, os *Resistors* e outros componentes que fazem parte dos processos de produção que ocorrem na linha.

5. Modelo de Simulação

No presente capítulo são descritos os principais passos na modelação da linha de produção da *Delphi*. É realizada a simulação do modelo e são obtidos os resultados. Depois, é realizada uma análise comparativa dos resultados da simulação e dos valores das medidas de desempenho da linha de produção relativas ao mês de Fevereiro de 2014, para testar a validade do modelo cosntruído.

5.1 Construção do Modelo de Simulação

O modelo de simulação desenvolvido neste trabalho é um modelo estocástico, dinâmico e discreto. Considera-se estocástico uma vez que são considerados no modelo *inputs* estocásticos. O modelo desenvolvido é dinâmico pois tem em conta o factor tempo. A simulação é realizada tendo em conta um determinado período de tempo, durante o qual o estado dos objectos modelados sofre alterações. Por fim, o modelo é discreto pois o estado do sistema é alterado em momentos discretos do tempo e não de uma forma contínua. Um instante de tempo discreto é, por exemplo, o instante de tempo em que avaria uma máquina.

Embora muitas vezes o mesmo sistema possa apresentar características *terminating* e *steady-state*, a simulação a desenvolver no presente trabalho é considerada *steady-state*, uma vez que a linha funciona 24 horas por dia, 5 dias por semana, e que a produção de um dia afecta o funcionamento da linha no dia seguinte, isto é, as condições finais de um dia são as condições iniciais do dia seguinte.

O modelo foi construído tendo por base as condições de funcionamento observadas presencialmente na linha da *Delphi* e desenvolvido através do *software* de simulação Arena, versão 9.0.

A figura 5.1 apresenta, de um ponto de vista macro, o modelo de simulação desenvolvido. As 9 estações da linha foram divididas em 6 sub-modelos lógicos. As figuras representativas da modelação em Arena de cada sub-modelo criado são apresentadas no Anexo 2 a esta dissertação.

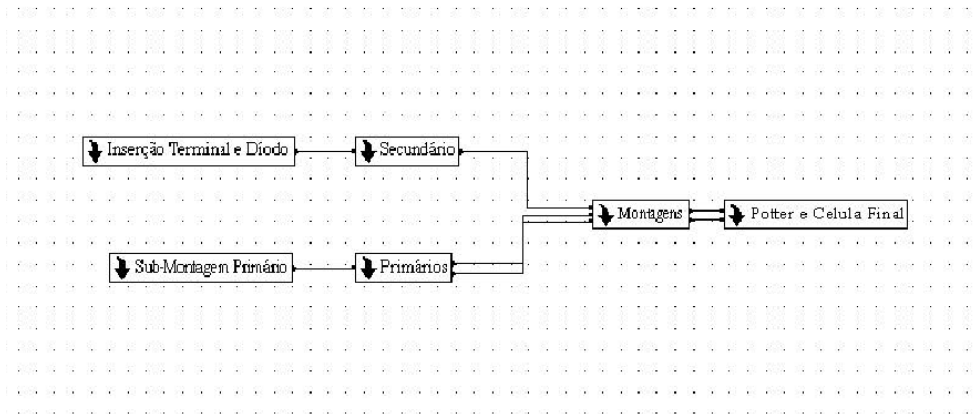


Figura 5.1 – Modelo macro do sistema.

No sub-modelo *Primários* são modeladas as duas Células do Primário, pelo que são definidas duas saídas de componentes para este sub-modelo. Como esquematizado no modelo conceptual, as duas Células de Montagem, representadas no sub-modelo *Montagens*, necessitam de primários provenientes das Células do Primário mas também de secundário bobinados provenientes da Célula do Secundário. A estrutura do modelo de simulação é, assim, em tudo semelhante à do modelo conceptual previamente apresentado.

A construção do modelo inicia-se com a definição de horários de cada estação de trabalho. Este passo é realizado no módulo *Schedule* do *software* Arena, e permite editar os períodos de tempo de funcionamento e de paragem programados para cada estação. O procedimento para definição dos padrões de tempo de cada estação encontra-se ilustrado na Figura 5.2.

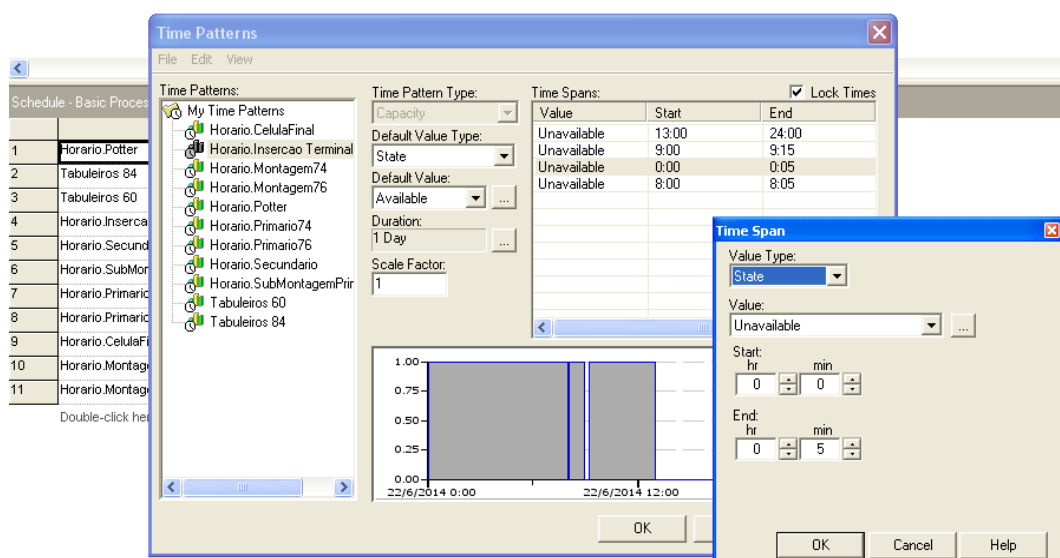


Figura 5.2 – Definição de horários de cada estação de trabalho.

Na Figura 5.2, é feita a especificação dos períodos de tempo em que se sabe que a estação, neste caso a Inserção do Díodo e Terminal, não está disponível para produção. Para esta estação em particular, está programada a paragem nos primeiros 5 minutos de cada turno, 15 minutos a meio da manhã, e das 13h00 até ao dia seguinte.

As distribuições estatísticas dos tempos de paragem das estações são introduzidas no módulo *Failure*. A Figura 5.3 permite constatar a existência de um comportamento aleatório dos períodos de funcionamento e de paragem das estações de trabalho da linha.

Figure - Advanced Process

	Name	Type	Up Time	Up Time Units	Down Time	Down Time Units	Uptime in this State only
	Falhas Insercao	Time	POIS(15.5)	Minutes	1.5 + GAMM(1.53 , 3.01)	Minutes	Ocupado
	Falhas Secundario	Time	6.5 + 11*BETA(1.08 , 1.93)	Minutes	1.5 + 11*BETA(1.47 , 1.82)	Minutes	Ocupado
	Falhas Sub Montagem	Time	2.5 + 28*BETA(0.786 , 0.773)	Minutes	1.5 + LOGN(14.1 , 22.2)	Minutes	Ocupado
	Falhas Primario M274	Time	4.5 + 31*BETA(1.13 , 1.6)	Minutes	1.5 + LOGN(9.55 , 13)	Minutes	Ocupado
	Falhas Primario M276	Time	7.5 + 33*BETA(0.798 , 0.944)	Minutes	1.5 + GAMM(5.8 , 1.42)	Minutes	Ocupado
	Falhas Montagem M274	Time	2.5 + GAMM(8.61 , 1.25)	Minutes	2.5 + ERLA(2.77 , 2)	Minutes	Ocupado
	Falhas Montagem M276	Time	2.5 + GAMM(9.69 , 1.43)	Minutes	2.5 + GAMM(11.2 , 1.13)	Minutes	Ocupado
	Falhas Potter	Time	10 + 270*BETA(0.433 , 1.04)	Minutes	2.5 + BETA(1.48 , 1.77)	Minutes	Ocupado
	Falhas Celula Final	Time	6.5 + 24*BETA(0.953 , 1.51)	Minutes	2.5 + 10*BETA(1.54 , 2.17)	Minutes	Ocupado

Double-click here to add a new row.

Figura 5.3 – Especificações realizadas no módulo *Failure*.

Os tempos recolhidos e tratados estatisticamente deram origem, para cada estação de trabalho da linha, a duas distribuições de probabilidade, uma para os períodos de funcionamento (*Up Time*) e outra para os tempos de paragem (*Down Time*). Pela observação da Figura 5.3, constata-se que para a estação Célula Final, por exemplo, os períodos de funcionamento e de paragem são ambos caracterizados de acordo com uma distribuição Beta, porém com parâmetros diferentes.

Dado o comportamento aleatório do sistema, o passo seguinte passa pela definição dos possíveis estados de cada estação. Este passo é feito no módulo *StateSet*, e é importante para perceber a percentagem de tempo em que a estação se encontra em cada estado. Como é possível observar na Figura 5.4, os quatro possíveis estados de cada estação estão associados aos estados automáticos existentes no Arena, bem como às falhas definidas anteriormente no módulo *Failure*.

StateSet - Advanced Process		
	Name	States
1	States.Estacao.Insercao	4 rows
2	States.Estacao.Secundario	4 rows
3	States.Estacao.Sub.Montagem	4 rows
4	States.Estacao.Primario M274	4 rows
5	States.Estacao.Primario M276	4 rows
6	States.Estacao.Montagem M274	4 rows
7	States.Estacao.Montagem M276	4 rows
8	States.Estacao.Potter	4 rows
9	States.Estacao.Celula Final	4 rows

Double-click here to add a new row.

States		
	State Name	AutoState or Failure
1	Ocupado	BUSY
2	Down	Falhas.Secundario
3	Livre ou Bloqueado	IDLE
4	Inactivo	INACTIVE

Double-click here to add a new row.

Figura 5.4 - Definição dos possíveis estados de cada estação.

O passo seguinte na construção do modelo de simulação é a associação dos horários de trabalho e das falhas definidas no módulo *Failure* a cada estação de trabalho da linha. Esta associação é realizada no módulo *Resource*, e encontra-se ilustrada na Figura 5.5. Considerando a estação Célula do Secundário como exemplo, no módulo *Resource* é feita a associação entre o horário definido para esta estação (Horario.Secundario), os possíveis estados em que a estação se pode encontrar (States.Estacao.Secundario) e, finalmente, o comportamento aleatório associado a esta estação (Falhas.Secundario).

Resource - Basic Process											
	Name	Type	Schedule Name	Schedule Rule	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Initial	Failures	Report Statistics
1	Estacao.Insercao	Based on Schedule	Horario.Insercao Terminal e Diodo	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Insercao		1 rows	✓
2	Estacao.Secundario	Based on Schedule	Horario.Secundario	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Secundario		1 rows	✓
3	Estacao.Sub.Montagem	Based on Schedule	Horario.Sub.MontagemPrimario	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Sub.Montagem		1 rows	✓
4	Estacao.Primario M274	Based on Schedule	Horario.Primario74	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Primario M274		1 rows	✓
5	Estacao.Primario M276	Based on Schedule	Horario.Primario76	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Primario M276		1 rows	✓
6	Estacao.Montagem M276	Based on Schedule	Horario.Montagem76	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Montagem M276		1 rows	✓
7	Estacao.Montagem M274	Based on Schedule	Horario.Montagem74	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Montagem M274		1 rows	✓
8	Estacao.Pre.Forno	Based on Schedule	Horario.Potter	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Potter		1 rows	✓
9	Estacao.Forno de Gel	Based on Schedule	Horario.Potter	Preempt	0.0	0.0	0.0			0 rows	✓
10	Estacao.Camara de Vazamento	Based on Schedule	Horario.Potter	Preempt	0.0	0.0	0.0			0 rows	✓
11	Estacao.Forno de Cura	Based on Schedule	Horario.Potter	Preempt	0.0	0.0	0.0			0 rows	✓
12	Estacao.Celula Final	Based on Schedule	Horario.CelulaFinal	Preempt	0.0	0.0	0.0	States.Estacao.Celula Final		1 rows	✓

Double-click here to add a new row.

Figura 5.5 - Especificações realizadas no módulo *Resource*.

O modelo foi construído de modo a que a produção nas estações seja interrompida ao ser atingido o nível máximo de lotes de peças permitido em supermercado, sendo reiniciada quando este nível for igual ao ponto de encomenda calculado para cada estação.

A Figura 5.6 apresenta o algoritmo criado em Arena para reflectir o controlo de produção realizado pelos operadores na estação de Sub-Montagem do Primário. O algoritmo apresentado é utilizado, com as necessárias alterações das especificações (ponto de encomenda e capacidade do supermercado) de cada estação de trabalho, no controlo de produção de todas as estações da linha da *Delphi* modeladas em Arena.

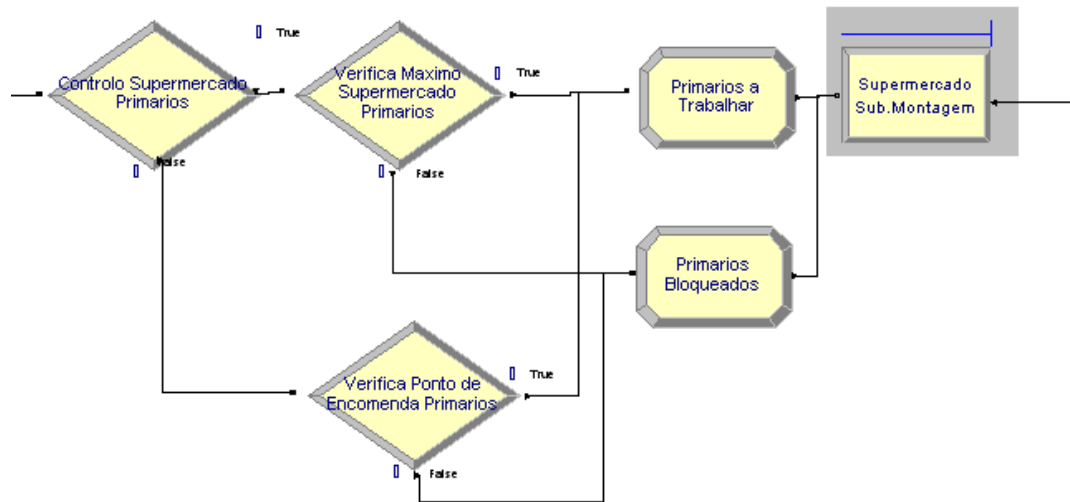


Figura 5.6 – Algoritmo criado para o controlo de produção.

O mecanismo apresentado na Figura 5.6 baseia-se na interpretação, a cada instante, dos valores de determinadas variáveis definidas previamente. A criação de variáveis é realizada no módulo *Variable* do Arena, sendo obrigatória a inserção do valor inicial da variável aquando da sua criação. Após ter sido criada a variável *Controlo Primarios*, é possível desenvolver o algoritmo apresentado na Figura 5.6.

A variável *Controlo Primarios* é inicializada com o valor 1. Enquanto o supermercado dos dois Primários for inferior ao valor máximo definido, a variável continuará com este valor, e os lotes de peças saem da estação Sub-Montagem do Primário directamente para um dos Primários. Se, pelo contrário, o supermercado dos Primários estiver completo no momento da saída de um lote de peças da estação de Sub-Montagem, a variável *Controlo Primarios* passa a ter o valor 0 (atribuição realizada no módulo *Assign*). Em vez de ir directamente para um dos Primários, o lote de peças passa a fazer parte do supermercado da Sub-Montagem do Primário. Quando se dá a saída de um novo lote de peças da

estação de Sub-Montagem, segundo o algoritmo criado, como a variável vale 0, será verificado o ponto de encomenda dos dois Primários. Se nesse instante o número de lotes que está no supermercado nos Primários for inferior ao ponto de encomenda, a variável *Controlo Primarios* passa novamente a valer 1, e o lote de peças é transferido para um dos Primários. Se, por outro lado, o nível de peças nos supermercados dos Primários continuar superior ao ponto de encomenda, a variável não altera o seu valor, e o lote de peças é transferido para o supermercado da Sub-Montagem. O algoritmo assim criado tem como principal objectivo evitar a passagem de lotes de peças a estações bloqueadas, isto é, sem espaço nos seus supermercados para produzir mais peças.

O Arena possibilita ainda, através do módulo *Statistic*, fazer a recolha de estatísticas por estação de trabalho. Para o modelo construído pretende-se a recolha de valores no que diz respeito à produção e à taxa de utilização de cada estação de trabalho.

5.2 Simulação e Validação do Modelo

Após a construção do modelo de simulação, é possível proceder à sua simulação. Para validar o modelo construído, os resultados obtidos após a simulação serão comparados com os resultados provenientes do sistema real.

A caixa de diálogo *Run Setup* do Arena (Figura 5.7) permite a configuração das experiências que serão realizadas usando o modelo. Nesta caixa de diálogo é definido o número de vezes que o modelo deve funcionar (número de replicações), o período de tempo no início da simulação do modelo em que não são recolhidas quaisquer estatísticas para estimativa das medidas de desempenho (período de aquecimento), com as respectivas unidades de tempo e, ainda, o número de horas a considerar por dia de trabalho.

A definição de um período de aquecimento permite condicionar a recolha de dados durante a simulação a partir do instante de tempo em que se considera que o sistema atinge o estado estacionário. Para obter este período de tempo, foi analisado visualmente o comportamento de algumas medidas de desempenho do sistema durante uma replicação do modelo, tendo sido observável que são necessários aproximadamente 3 dias para que as condições em que inicia a

simulação não sejam reflectidas nesse mesmo comportamento. Assim, foi considerado um período de aquecimento de 3 dias.

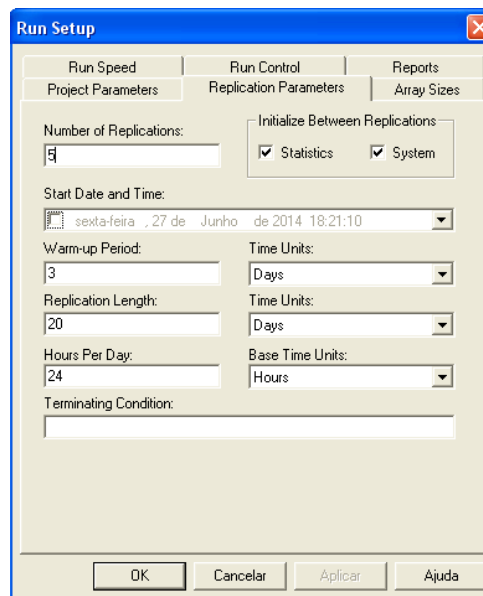


Figura 5.7 – Caixa de diálogo *Run Setup* para a configuração das replicações.

No que diz respeito à duração da replicação (de cada experiência), pretendia-se simular para 1 mês de trabalho, ou seja, 17 dias. Como na definição da duração da simulação está incluído o período de aquecimento (3 dias), é necessário dimensionar a simulação para 20 dias para que realmente sejam recolhidos dados para estimar as medidas de desempenho durante 17 dias. O modelo foi replicado 5 vezes para garantir que a análise estatística contempla a variabilidade existente de replicação para replicação.

Após terem sido realizadas as 5 replicações do modelo, o Arena fornece relatórios detalhados sobre os recursos utilizados, a dimensão das filas de espera, entre outras características, para o período simulado. Assim, através dos relatórios é possível obter informação relativamente à dimensão das filas de espera em cada estação, a utilização de cada estação e o tempo total que uma peça demora a passar através do sistema, no que diz respeito aos seus valores médios, máximos, mínimos e estimativa de metade da amplitude do intervalo de confiança para um nível de confiança de 95%. Os relatórios das medidas de desempenho que se pretendem analisar para a validação do modelo desenvolvidos são os relatórios relativos ao número de peças que são produzidas em cada estação (*Output*) e à taxa de utilização das mesmas (*Frequency*). Na Figura 5.8 é apresentado o

relatório do número de peças que foram produzidas em cada estação de trabalho na quarta replicação do modelo desenvolvido.

Replication 4		Start Time:	72,00	Stop Time:	480,00	Time Units:	Hours
Output							
Output	Value						
NumberOut Celula Final	73,114.00						
NumberOut Insercao	1,470.00						
NumberOut Montagem M274	44,688.00						
NumberOut Montagem M276	28,224.00						
NumberOut Potter	2,413.00						
NumberOut Primario M274	532.00						
NumberOut Primario M276	336.00						
NumberOut Secundario	1,464.00						
NumberOut Sub.Montagem	860.00						

Figura 5.8 – Relatório de produção por estação.

O relatório *Frequencies* apresenta o número de ocorrências, o tempo médio e a percentagem de tempo que as estações de trabalho se encontram em cada um dos quatro estados definidos. Na Figura 5.9 apresenta-se parte deste relatório, relativo à primeira replicação do modelo.

18:24:17

Frequencies

Junho 27, 20

Unnamed Project

Replications: 5

Replication 1

Start Time:72,00

Stop Time:480,00

Time Units:Hours

Utilizacao Celula Final	Number Obs	Average Time	Standard Percent	Restricted Percent
Down	519	0.1122	14.27	14,29
Inativo	52	2.6583	33.88	33,93
Livre ou Bloqueado	34	2.2579	18.82	18,84
Ocupado	563	0.2383	32.89	32,94
OUT OF RANGE	12	0.04996828	0.15	--

Utilizacao Insercao	Number Obs	Average Time	Standard Percent	Restricted Percent
Down	387	0.1015	9.63	9,63
Inativo	51	3.8006	47.51	47,55
Livre ou Bloqueado	59	1.2501	18.08	18,09
Ocupado	448	0.2250	24.71	24,73
OUT OF RANGE	5	0.06841804	0.08	--

Utilizacao Montagem M274	Number Obs	Average Time	Standard Percent	Restricted Percent
Down	503	0.1364	16.81	16,85
Inativo	47	4.0217	46.33	46,43
Livre ou Bloqueado	33	1.2310	9.96	9,98
Ocupado	549	0.1982	26.68	26,74
OUT OF RANGE	16	0.05781868	0.23	--

Figura 5.9 – Detalhe do relatório *Frequencies*.

Considerando como exemplo a estação Célula Final, é possível perceber que, para a primeira replicação, a estação esteve, aproximadamente, 14.3% do tempo simulado parada por razões de avaria, sendo que em média essa paragem foi de

cerca de 7 minutos (0.1122 horas). Ainda relativamente à estação Célula Final, e para a primeira replicação do modelo, observa-se que a estação não está planeada, isto é, está inactiva, em aproximadamente 33.9% do tempo, e que, considerando a totalidade do tempo simulado (incluindo os períodos em que está inactiva), a percentagem de tempo em que a estação Célula Final está efectivamente a trabalhar é de, aproximadamente, 32.9%.

Para realizar a análise comparativa dos resultados do modelo e do sistema real, procedeu-se ao tratamento dos dados apresentados nos relatórios de *Output* e *Frequencies*. Os valores de produção, por estação, são apresentados em termos de peças e tabuleiros, dependendo da estação, pelo que estes últimos devem também ser apresentados em número de peças. No cálculo da taxa de utilização das estações deve ser tido em conta apenas o tempo em que a estação está activa, pelo que esta deve ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$\bullet \text{ Utilização da Estação (\%)} = \frac{(\%) \text{ Ocupado}}{100 - (\%) \text{ Inactivo}} \quad (1)$$

Analisando os relatórios fornecidos pelo Arena após a replicação do modelo, é possível construir a Tabela 5.1 que resume os resultados obtidos para as duas medidas de desempenho em estudo.

Tabela 5.1 – Peças produzidas e taxa de utilização média para as estações de trabalho.

Estação de Trabalho	Peças Produzidas	Utilização da Estação (%)
Inserção Díodo e Terminal	88 200	47.1
Célula do Secundário	87 840	63.5
Sub-Montagem do Primário	72 240	54.3
Células do Primário	72 912	30.0
Célula de Montagem M274	44 688	49.9
Célula de Montagem M276	28 224	3.2
<i>Potter</i>	72 390	69.4
Célula Final	73 114	49.9

Comparando os resultados apresentados no presente capítulo com os disponibilizados no sub-capítulo Desempenho Actual da Linha (Tabela 3.13), para o desempenho da linha durante o mês de Fevereiro, é possível construir gráficos comparativos que permitam a realização de uma validação subjectiva do modelo de simulação. As Figuras 5.10 e 5.11 comparam os resultados obtidos pelo modelo com os provenientes do sistema real no que diz respeito, respectivamente, à quantidade de produção e à taxa de utilização de cada estação.

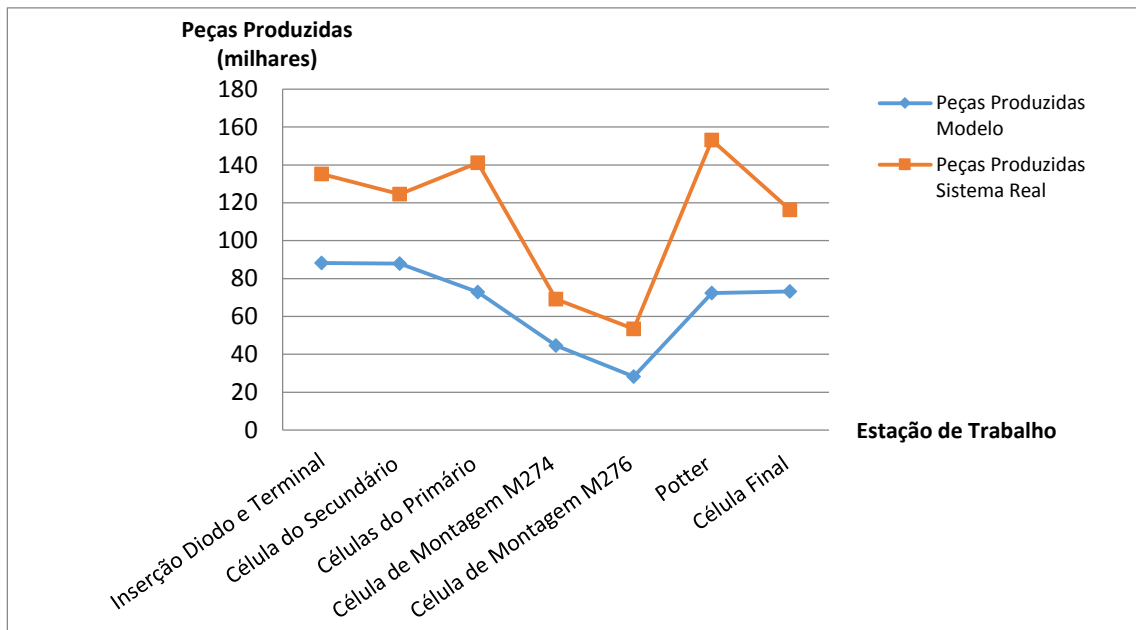


Figura 5.10 – Produção por estação com base no modelo e sistema real.

A Figura 5.10 permite concluir que a quantidade de peças produzida por estação com base no modelo foi, em geral, muito inferior à registada no sistema real. Pela observação da Figura 5.11, o modelo teve um desempenho inferior ao do sistema real também na taxa de utilização das estações de trabalho.

Apesar da construção do modelo ter sido realizada de acordo com os processos reais observados na linha de produção, é possível perceber através de uma validação subjectiva que os resultados da replicação do modelo de simulação se encontram bastante distantes dos provenientes do sistema real. Embora a validação estatística seja a mais indicada para este tipo de estudo, a validação subjectiva do modelo é suficiente para concluir que os resultados gerados pelo modelo não são coerentes com os do sistema real, e como tal o modelo construído não é considerado válido.

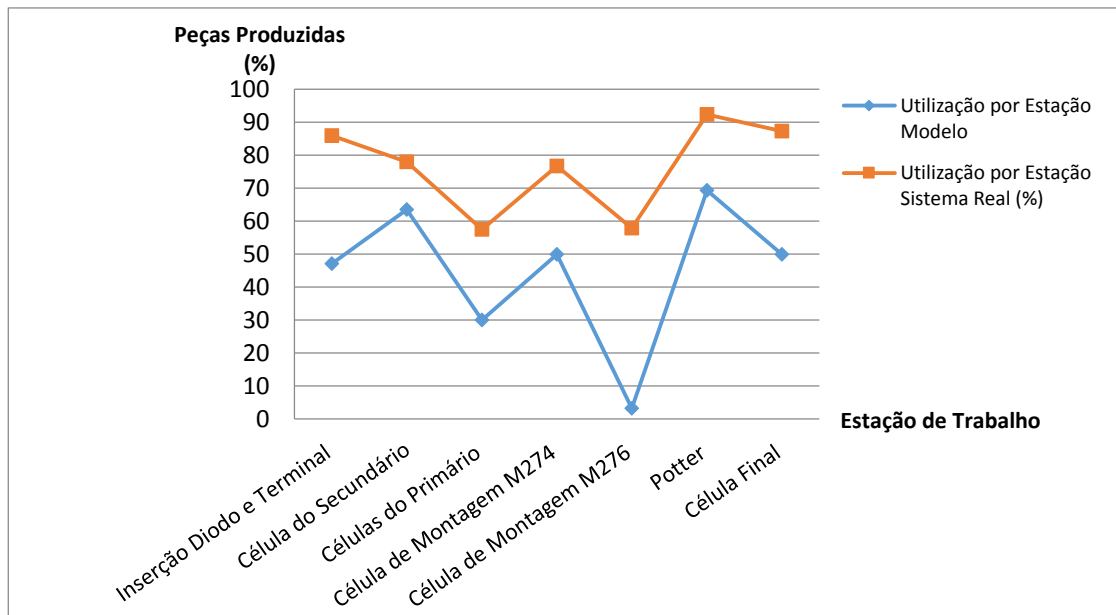


Figura 5.11 – Comparação entre a utilização por estação do modelo e do sistema real.

No capítulo de discussão de resultados são apresentadas razões que ajudam a justificar a diferença de resultados verificada, e que impede a validação do modelo de simulação desenvolvido.

6. Discussão de Resultados e Conclusão

No capítulo final da presente dissertação são identificadas razões que podem estar na origem dos resultados obtidos pelo modelo de simulação desenvolvido e que não permitiram concluir que o modelo seja válido. Nas conclusões da dissertação são apresentadas as contribuições do estudo realizado, assim como algumas recomendações de trabalhos futuros.

6.1 Discussão de Resultados

As diferenças encontradas entre os resultados obtidos a partir da simulação do modelo e o desempenho da linha de produção da *Delphi* durante o mês de Fevereiro de 2014 podem ter origem sobretudo em erros na modelação em Arena, na interpretação do real funcionamento do sistema, e também nas metodologias utilizadas no decorrer do trabalho. São seis os principais factores que podem estar na origem da discrepância de resultados, nomeadamente:

i. Ausência de validação do modelo conceptual da linha de produção;

O terceiro passo da metodologia apresentada por Law (2003) para o desenvolvimento de um estudo de simulação bem-sucedido passa pela validação, por parte de alguém com conhecimentos do processo, do modelo conceptual desenvolvido. Este passo não foi formalmente concluído no presente trabalho, pelo que algumas simplificações ou pressupostos assumidos podem de alguma forma, ter afectado a capacidade do modelo para reproduzir o comportamento do sistema, isto é, produzir resultados semelhantes ao sistema real. Apenas parte das simplificações e pressupostos foram validados com o responsável pelo acompanhamento do presente trabalho na *Delphi*, pelo que é possível que o modelo de simulação tenha sido construído com base num modelo conceptual não totalmente correcto ou incompleto.

ii. Metodologia de modelação em Arena;

Law e Kelton (2000) chamam a atenção para os perigos decorrentes de construir um modelo de simulação com um nível de complexidade superior ao necessário. Uma critica que pode ser realizada à metodologia de construção do modelo é o

facto do modelo ter sido construído de uma forma sequencial e com toda a complexidade desde a primeira estação da linha, quando se recomendaria a construção da totalidade da linha de forma simples e que o grau de detalhe e de complexidade aumentasse gradualmente. Este facto deu origem a que as últimas estações de trabalho da linha de produção tivessem menos tempo para serem modeladas e testadas, o que pode ter afectado o desempenho destas estações e, consequentemente, de toda a linha de produção em análise;

iii. Período utilizado para a recolha de dados;

O facto da recolha de tempos ter sido realizada entre Abril e Junho e os dados recolhidos para o desempenho da linha de produção serem de Fevereiro, pode contribuir para a diferença de resultados encontrada. Alguns dados referentes à linha de produção foram recolhidos no início do trabalho, durante os meses de Fevereiro e Março, mas os dados referentes aos períodos de paragem e de funcionamento de cada estação foram recolhidos num período diferente. Esta diferença temporal pode resultar em distribuições de probabilidade que representam bem os dados recolhidos mas que não reflectem o comportamento das estações de trabalho da linha de produção durante o mês de Fevereiro de 2014.

iv. Imprecisão nos tempos registados diariamente pelos operadores;

Para obter os períodos de funcionamento e de paragem de cada estação de trabalho foram tidos em conta registos diários de produção existentes em cada estação, actualizados regularmente pelos operadores no decorrer dos seus turnos de trabalho. Durante esse registo, os operadores incorrem muitas vezes na imprecisão de arredondar os valores de tempo a registar, uma vez que a medição de tempo não é feita com um cronómetro.

Os tempos recolhidos teriam sido mais precisos se a recolha fosse feita por cronometragem, em vez de obtida através dos registos diários de produção. Contudo, teria sido necessário muito tempo para formar um conjunto de dados que pudesse dar origem a uma distribuição de probabilidades robusta.

v. Produção acima do limite máximo dos supermercados;

Na proximidade das estações de trabalho é apresentada informação relativa ao ponto de encomenda e ao limite máximo do supermercado para cada estação. Verificou-se, porém, que em determinadas situações os operadores, no decorrer do seu turno de trabalho, continuavam a produzir lotes de peças já depois de ter sido atingido o limite máximo nos supermercados. Estes procedimentos que ocorrem esporadicamente na linha de produção são diferentes dos modelados, e, como tal, podem ajudar a explicar a diferença nos resultados obtidos para as medidas de desempenho.

vi. Dificuldades inerentes à utilização do *software* Arena.

Como Banks *et al.* (2005) e Shannon (1998) reforçam nos seus trabalhos, uma das principais desvantagens de um estudo de simulação é o facto de a sua utilidade depender muito da qualidade do modelo e, por isso, das capacidades técnicas do modelador. O facto de em determinadas ocasiões terem surgido dificuldades para reproduzir em Arena alguns comportamentos da linha de produção, levou a que fossem utilizados mecanismos que podem não ter sido os mais correctos ou indicados. Um conhecimento mais aprofundado do *software* poderia ter contribuído para resultados mais próximos dos esperados.

Tendo sido estes os principais factores que contribuíram para que os resultados do modelo, no que às medidas de desempenho diz respeito, tivessem ficado aquém do esperado, poderão ter existido outros factores de menor relevo a justificar esta discrepância em relação aos valores de desempenho da linha de produção.

6.2 Conclusões ao Trabalho

O objectivo proposto inicialmente para o presente trabalho passava pela realização de um estudo de simulação de uma linha de produção. O estudo de simulação contemplava a recolha e tratamento de dados, a construção de um modelo conceptual e o desenvolvimento, simulação e validação de um modelo de simulação computacional. Assim, o objectivo do trabalho foi apenas parcialmente cumprido, uma vez que o modelo de simulação desenvolvido não foi validado com sucesso.

Uma das principais aprendizagens que o presente trabalho permitiu foi a importância que o profundo conhecimento do *software* e do sistema que se pretende simular têm na construção de um modelo de simulação robusto, que represente de um modo fiel o sistema real e permita, assim, a tomada de decisões.

Apesar dos objectivos não terem sido atingidos na sua totalidade, este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de experiência prática na modelação de um sistema real através de um pacote comercial de simulação, mais especificamente o Arena. Outra contribuição do trabalho foi o tratamento estatístico dos dados recolhidos na linha de produção, que pode servir como ferramenta para os responsáveis pelos processos de produção da *Delphi* reverem e melhorarem o funcionamento das estações de trabalho. Este trabalho pode igualmente ser utilizado como referência para futuros trabalhos académicos no âmbito da simulação em ambientes de produção.

Como recomendação de trabalhos futuros, seria interessante eliminar algumas das simplificações assumidas neste trabalho, e considerar, por exemplo, os tempos de carregamento e descarregamento das estações de trabalho e de deslocação entre as mesmas na modelação realizada. Outra recomendação para futuro trabalho seria a simulação de todo o processo de produção das bobinas de ignição, melhorando o modelo construído neste trabalho e adicionando processos não contemplados, como por exemplo os que ocorrem na zona dos plásticos da fábrica da *Delphi*. Tendo em conta as constantes alterações observadas nos *layouts* das linhas de produção existentes na *Delphi*, seria interessante a realização, no futuro, de um estudo de simulação que tivesse como objectivo comparar diferentes alternativas de *layout*, e que permitisse a identificação da alternativa mais vantajosa tendo em conta determinados critérios e medidas de desempenho.

Referências

- Abed, S. (2008). A Simulation Study to Increase the Capacity of a Rusk Production Line. *WSEAS Transactions on Information Science & Applications*, Vol.5, No. 9, September, 1395-1404. ISSN: 1790-0832.
- Altendorfer, K., Felberbauer, T., Gruber, D., & Hubl, A. (2013). Application of a Generic Simulation Model to Optimize Production and Workforce Planning at an Automotive Supplier. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 2689 – 2697.
- Apresentação Institucional: *Delphi – A Celebração da Excelência*. HR Mini Conferência, 31 de Maio 2011.
- Apresentação Institucional: Delphi Corporation – Gary Cameron, Director. *Forward and Advanced Engineering Power Electronics*, October 11, 2010.
- Banks, J., Carson II, J., Nelson, B. & Nicol, D. (2005). *Discrete-Event Simulation*. 4th Edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Barroso, A.P. (2012). Slides de Apoio à Disciplina de Simulação. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.
- Boginski, V., Mun, I., Wu, Y., Mason, K & Zhang, C. (2007). Simulation and Analysis of Hospital Operations and Resource Utilization Using RFID Data. *2007 IEEE International Conference on RFID*, 26-28 March, 199-204.
- Chan, F., & Prakash, A. (2012). Inventory Management in a Lateral Collaborative Manufacturing Supply Chain: a Simulation Study. *International Journal of Production Research*, Vol.50, No. 16, 15 August, 4670-4685. ISSN: 1366-588X.
- Chapman, R., Hamilton, D., Box, D., Kuhr, M., MacDonald, J., & Hamilton, S. (2007). Simulation of Army Unmanned Aerial Vehicle Communications. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, 1324-1327.
- Cho, S., & Eppinger, D. (2005). A Simulation-Based Process Model for Managing Complex Design Projects. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol.52, No.3, August, 316-328.

- Filho, P., & Cruz, G. (2007). Using Simulation to Predict Market Behaviour for Outbound Call Centers. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*.
- Hecker, F., Hussein, W. & Becker, T. (2010). Analysis and Optimization of a Bakery Production Line Using Arena. *International Journal of Simulation Modeling* 9, 208 - 216. ISSN: 1726-4529.
- Heshmat, M., El-Sharief, M., & El-Sebaief, M. (2013). Simulation Modeling of Automatic Production Lines with Intermediate Buffers. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, No. 7, July. ISSN: 2229-5518.
- Kelton, D., Sadowski, P., & Sadowski, A. (2001). *Simulation with Arena*. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Kose, E. Basar, E., Demirci, E., Guneroglu, A., & Erkebay, S. (2003). Simulation of Marine Traffic in Istanbul Strait. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11, 597-608. Doi: 10.1016/j.simpat.2003.10.001.
- Law, A.M. (2013). A Tutorial on how to Select Simulation Input Probability Distributions. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 306-320.
- Law, A.M. (2003). How to Conduct a Successful Simulation Study. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*.
- Law, A.M., & McComas, M.G. (1999). Simulation of Manufacturing Systems. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 56-59.
- Law, A., & Kelton, D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Longo, F., Mirabelli, G., & Papoff, E. (2005). Material Flow Analysis and Plant Lay-Out Optimization of Manufacturing System. *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, 5 - 7 September, Sofia, Bulgaria.
- McDonald, T., Van Aken, E., & Ellib, K. (2012). Utilizing Simulation to Evaluate Production Line Performance under Varying Demand Conditions. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3 3-14, Doi:10.5267/j.ijiec.2011.08.011

- Melton, T. (2005). The Benefits of Lean Manufacturing – What Lean Thinking has to Offer the Process Industries. *Chemical Engineering Research and Design*, 83 (A6):662-673. Doi: 10.1205/cherd.04351.
- Nsakanda, A., & Turcotte, M. (2004). Air Cargo Operations Evaluation and Analysis through Simulation. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*.
- Pandian, A., & Ali, A. (2014). The Effects of System Failures in a Robotic Assembly Line Simulation Modeling and DOE Analysis. *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Bali, Indonesia, 7-9 January, 513-522.
- Pita, J., & Wang, Q. (2010). A Simulation Approach to Facilitate Manufacturing System Design. *International Journal of Simulation Modelling* 9, 152-164. ISSN: 1726-4529.
- Robinson, S. (2010). Conceptual Modelling: Who Needs It?. *SCS M&S Magazine*, No.2, April.
- Seleim, A., Azab, A., & AlGeddawy, T. (2012). Simulation Methods for Changeable Manufacturing. *Proceedings of the 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems* 179-184. Doi:10.1016/j.procir.2012.07.032.
- Shannon, R.E. (1998). Introduction to the Art and Science of Simulation. *Proceeding of the 1998 Winter Simulation Conference*.
- Vasumathi, A., & Dhanavanthan, P. (2010). Application of Simulation Technique in Queuing Model for ATM Facility. *International Journal of Applied Engineering Research*, Dindigul, Vol. 1, No. 3. ISSN: 0976 – 425.

Anexos

Anexo 1

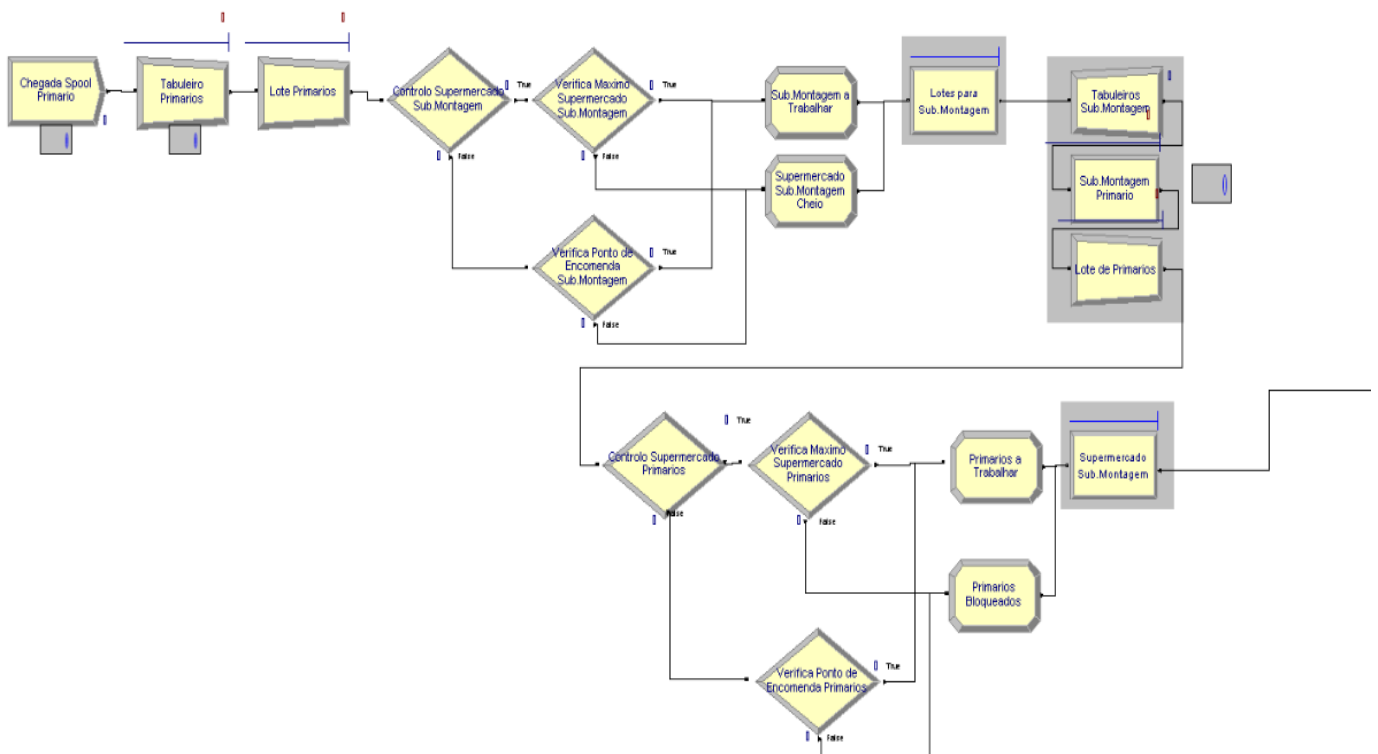
Amostra de tempos recolhida para o período de funcionamento da estação de trabalho Célula do Secundário (Minutos).

10	12	8	10	8	12	10	10	10	7
7	12	14	10	10	7	15	12	15	10
16	14	16	17	12	22	10	7	7	15
8	7	15	10	12	14	10	10	20	18
14	15	12	20	12	8	16	18	10	

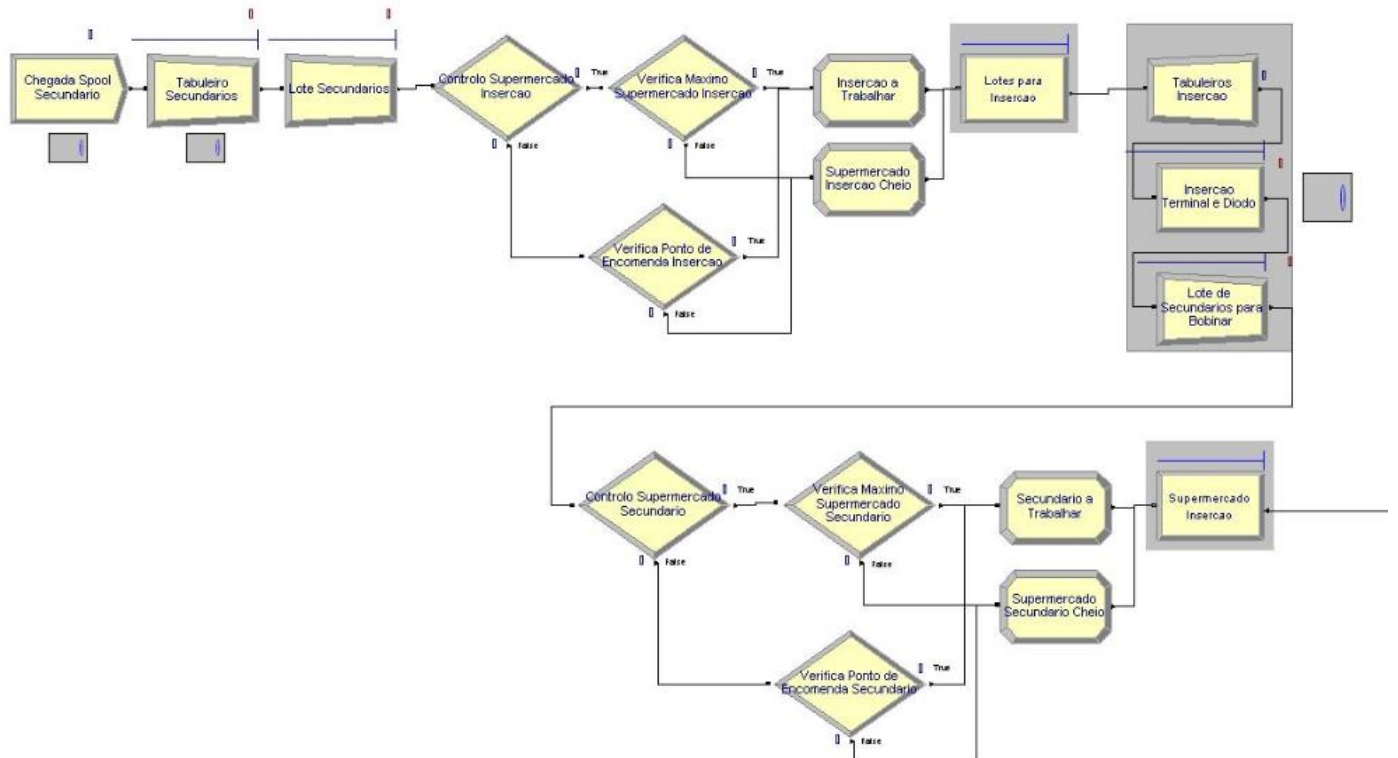
Anexo 2

Detalhe da modelação realizada em Arena para cada sub-modelo de simulação da linha de produção da *Delphi*.

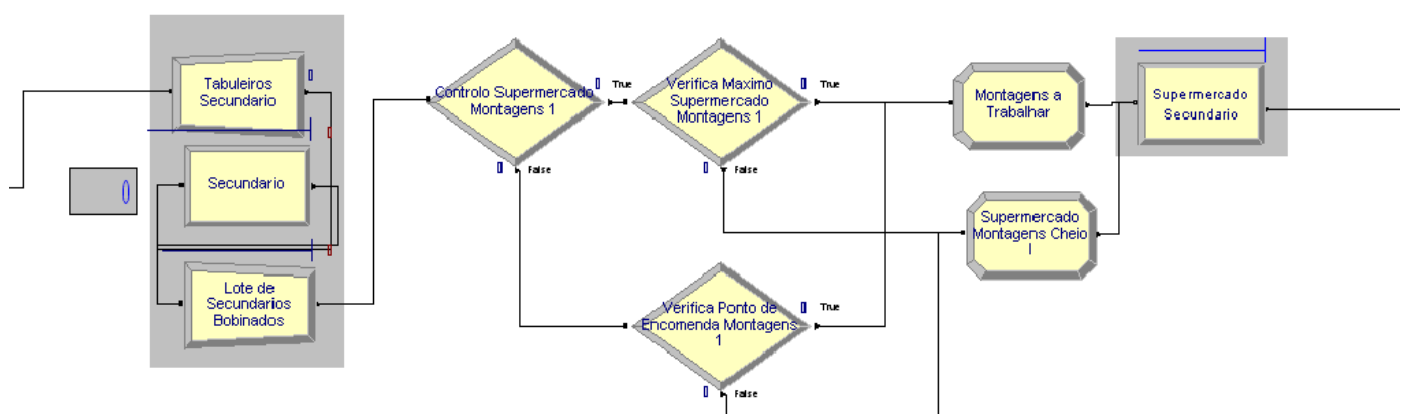
Anexo 2.1 Sub-modelo Sub-Montagem Primário



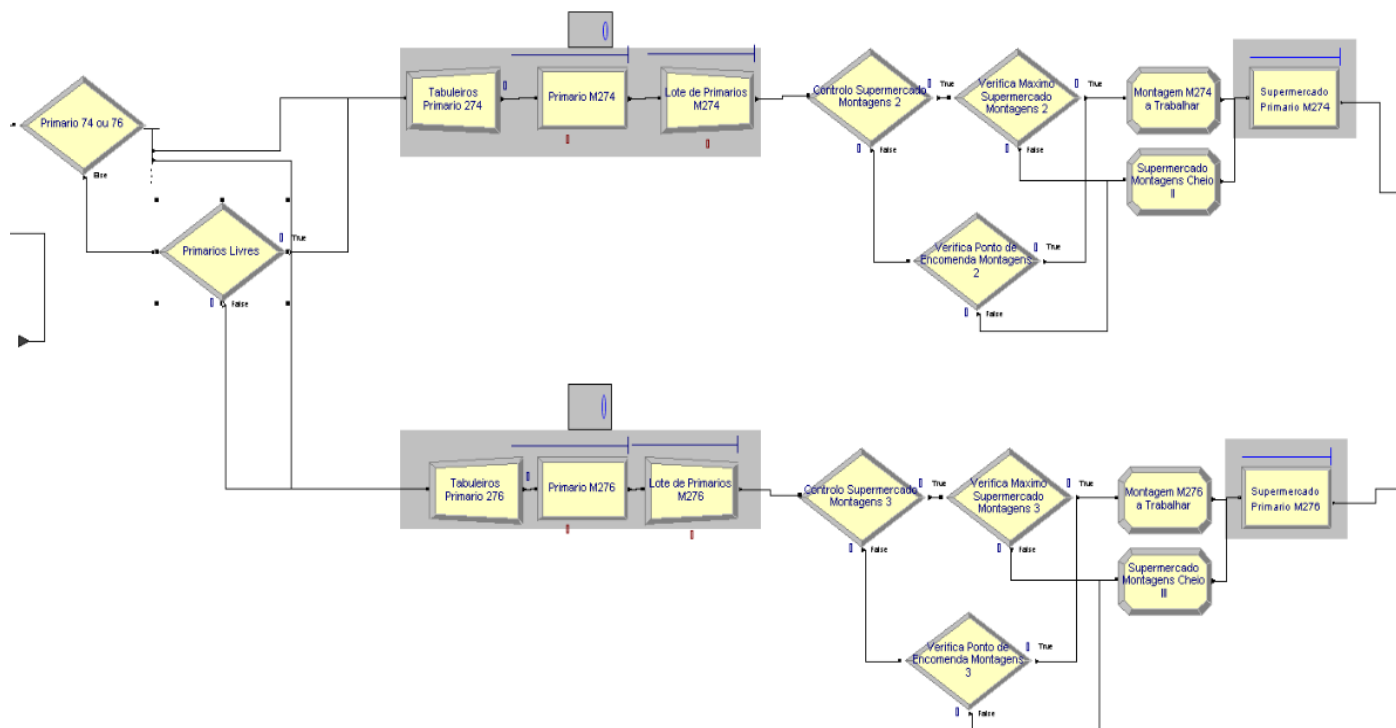
Anexo 2.2 Sub-modelo Inserção Díodo e Terminal



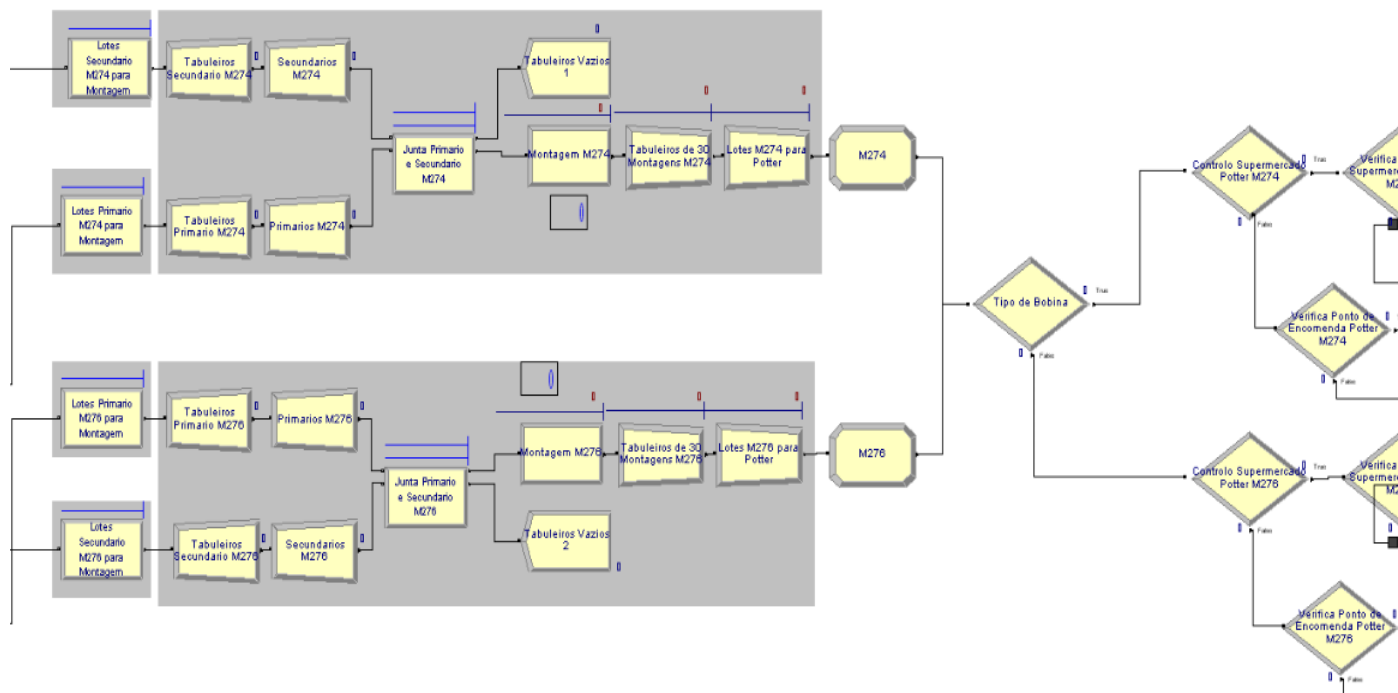
Anexo 2.3 Sub-modelo Secundário



Anexo 2.4 Sub-modelo Primários



Anexo 2.5 Sub-modelo Montagens



Anexo 2.6 Sub-modelo Potter e Célula Final

